土壌の物理性

第 125 号　2013 年 12 月

目　次

表紙写真の説明

2013 年度の土壌物理学会は会長の公約通り福島市で開催された．シンポジウム翌日の飯舘村の現地見学会には約 70 名の学会員が参加し、農地除染や森林モニタリングの取り組みを見学しながら現場における土壌物理研究の重要性を共有した．今号掲載の一連の資料をご参照ください．

第 11 回（ 2013 年度）土壌物理学会（論文賞）選考結果

土壌物理学会　学会賞選考委員会
委員長　波多野　隆介

学会賞選考委員会として下記の論文を論文賞としてふさわしいと決定しました.

1. 冠　　秀昭　　（独）農研機構　東北農業研究センター）
   関矢　博幸　　（独）農研機構　東北農業研究センター）
   遊佐　隆洋　　（宮城県古川農業試験場）
   大谷　隆二　　（独）農研機構　東北農業研究センター）

2. 対象論文
   電磁探査法による津波浸水農地の土壌電気伝導度迅速調査法
   土壌の物理性，第 121 号，pp. 19–28，2012

3. 推薦理由
   本研究は，多周波数電磁探査法（GEM-2，Geophex 社）を津波浸水農地に適用し，簡易且つ迅速な土壌電気伝導度測定法を確立しようとしたものである.
   まず，KCl の散布により塩分濃度を調整した疑似海水浸水圃場において，GEM-2 による EC_a 測定値が，土壌 EC センサーと同様の傾向を示すことを確認した．GEM-2 による EC_a の等高線図を，Google Earth 等の地図上に重ね合わせることで，広範囲な津波浸水のうちの特徴を容易に把握できることを示した．土壌 EC センサーを併用することで，定量的に，迅速性を損なわずに除塩に対応することが可能であることを示した.
   このように，本研究は除塩に必要な EC 情報を広範囲に迅速に得ることが出来る簡易測定を開発したものであり，東日本大震災からの復興に向けての取り組みに大きく貢献するものと期待される.
   以上の理由から，対象論文は第 11 回土壌物理学会賞（論文賞）に値するものと認め，ここに推薦する次第である.

本結果は 2013 年 10 月 25 日に開催された評議員会ならびに 26 日に開催された総会にて全会一致で承認され，総会後に授賞式が開催されました.

第 11 回（ 2013 年度）土壌物理学会（論文賞）選考結果

土壌物理学会　学会賞選考委員会
委員長　波多野　隆介

学会賞選考委員会として下記の論文を論文賞としてふさわしいと決定しました．

1．西脇　淳子　　（茨木大学農学部）
　　宮﨑　　毅　　（東京大学大学院農学生命科学研究科）
　　溝口　　勝　　（東京大学大学院農学生命科学研究科）

2．対象論文
　　NAPL 吸収多孔体径が Partitioning Interwell Tracer Test (PITT) に与える影響
　　土壌の物理性，第 123 号，pp. 73–79，2012

3．推薦理由
　本研究は，ガソリン，油，および有機溶剤などの難水溶性溶液（NAPL）を吸収させたサイズの異なる多孔体を模擬汚染源として，Partitioning Interwell Tracer Test（PITT）モデル実験（NAPL を分配せずに水相のみを移動するトレーサー（非分配トレーサー）と NAPL に分配しながら移動するトレーサー（分配トレーサー）の混合水溶液を同時に流し込み，両トレーサーの到達時間差から NAPL 量を推定する）を行い，トレーサーの破過曲線のテーリング形状を解析することで NAPL の偏在状況が推定できることを示したものである．NAPL の存在領域の大きさは推定精度に影響しないことも示されており，将来的には実規模での応用につながる成果と期待される．
　以上の理由から，対象論文は第 11 回土壌物理学会賞（論文賞）に値するものと認め，ここに推薦する次第である．

本結果は 2013 年 10 月 25 日に開催された評議員会ならびに 26 日に開催された総会にて全会一致で承認され，総会後に授賞式が開催されました．

第 11 回（ 2013 年度）土壌物理学会（ポスター賞）受賞者

土壌物理学会　学会賞選考委員会
委員長　波多野　隆介

開催日：2013 年 10 月 26 日
会　場：2013 年度土壌物理学会大会ポスターセッション会場
（福島市：福島大学キャンパス S 棟 1F）

ポスターセッション参加者の投票に基づいた選考により，下記の 5 氏が受賞されました.
おめでとうございます.

竹内　萌実（三重大学大学院生物資源学研究科）
湛水土壌表面近傍の Eh と DO の空間分布

三木　真隆（三重大学大学院生物資源学研究科）
窒素・炭素循環連結モデルによる土中の有機物分解の検討

長田友里恵（三重大学大学院生物資源学研究科）
凍結・融解過程における黒ボク土の不凍水量曲線

名倉　理紗（明治大学大学院農学研究科）
微小重力下における土壌粒子モデル間隙中の水分移動

上村　将彰（佐賀大学大学院農学研究科）
TDT による重粘土水田の含水比・間隙比のモニタリング

「土壌物理学会学会賞規定 2」の改正について

土壌物理学会事務局

2013 年 10 月 26 日に開催された土壌物理学会総会において，「土壌物理学会学会賞規定 2」の改正が下記の通り決定されました．本改正は一般会員からの推薦の位置づけを審査手順と合わせて見直したものです．本改正は 2013 年 10 月 26 日以降に適用いたします．

会員各位におかれましては，ご承知おき頂けますようお願い申し上げます．

新旧対応（改正日：2013 年 10 月 26 日）

現　行	改正後（2013 年 10 月 26 日以降）
2. 論文賞の選考 論文賞は，年 1 回、以下の手順により論文賞選考委員会「以下，選考委員会」で審査し，評議員会で決定する． （1）賞の対象とする論文は，「土壌の物理性」に，原則として前年度（前年 4 月 1 日から翌年の 3 月 31 日まで）に掲載された原著「論文」とする． （2）審査対象とする論文は，以下のいずれかとする： 1）選考委員が（1）に該当する論文の中から第 1 次審査として選考したもの， 2）（1）に該当する論文の中から正会員 1 名以上により推薦（自薦もしくは他薦）されたもの． （3）（2）－ 2）に記す論文の推薦は，学会誌「土壌の物理性」に公示された募集を受け，所定の書類を必要部数揃え，期日までに学会事務局に提出しなければならない． （4）選考委員会では，（2）に該当する論文の中から，第 2 次審査として受賞候補論文（以下，候補論文）を審査・選考し，評議員会へ付議する． （5）評議員会では，候補論文が受賞に適格かどうかを判定する．	2. 論文賞の選考 論文賞は，年 1 回，以下の手順により論文賞選考委員会「以下，選考委員会」で審査し，評議員会で決定する． （1）賞の対象とする論文は，「土壌の物理性」に，原則として前年度（前年 4 月 1 日から翌年の 3 月 31 日まで）に掲載された原著「論文」とする． （2）正会員（1 名以上）は, 学会賞受賞候補として（1）に該当する論文を自薦もしくは他薦することができる． （3）（2）に記す論文の推薦は，学会誌「土壌の物理性」に公示された募集を受け，所定の書類を必要部数揃え，期日までに学会事務局に提出しなければならない． （4）選考委員会は，（1）に該当する論文の中から,（2）の推薦も考慮して受賞候補論文（以下，候補論文）を審査・選考し，評議員会へ付議する． （5）評議員会では，候補論文が受賞に適格かどうかを判定する．

「土壌の物理性」の電子ジャーナル化の検討について

土壌物理学会事務局

昨今のインターネットの普及に伴って，国内外の著名な雑誌は電子ジャーナルに移行しつつあります．電子ジャーナル化することにより，インターネット上での検索にヒットしやすくなること，動画やデータなどの追加情報を論文につけられること，印刷経費や送料を大幅に節約できること，本棚のスペースに余裕ができることなどのメリットがあります．その一方で従来のページをめくる楽しみが失われるデメリットもあります．しかしながら，学会費だけで運営されている当学会の財政状態を分析するとその大部分を印刷経費が占めているのが現状です．今後，会員増による大幅な会費収入が見込めない限り，学会運営そのものが破綻をきたす恐れもあります．こうした背景を考慮して，10 月 25 日の評議員会および 26 日の総会では「土壌の物理性の電子ジャーナル化」について会員諸氏から意見を聴取し，その意見に基づいて電子ジャーナル化の可能性を検討することになりました．従来通り冊子体を希望する場合には，オプションとして印刷サービスを導入することなども考えられます．

会員諸氏におかれましては本学会の現状をご理解の上，「土壌の物理性」の電子ジャーナル化に関するご意見をお寄せくださいますようお願い致します．

宛先：　土壌物理学会編集委員会　編集委員長　取出伸夫　宛

方法：　（電子メール）E-mail: kibyosi@ml.affrc.go.jp

　　　　（Web 問い合わせ）https://js-soilphysics.com/contacts

締切：　2014 年 3 月 31 日

土壌物理学会ホームページの活用について

土壌物理学会事務局

土壌の物理性124号でもお知らせしましたように2013年5月に土壌物理学会のホームページがリニューアルオープンしました．新しいホームページでは，学会事務局からのNEWSや論文ダウンロードのサービスを利用できます．また，時代の潮流に合わせて，動画や生データの共有サイトなどのサービスも検討中です．現在は会員･非会員にかかわらず等しく学会サービスを利用できますが，近いうちに会員と非会員でサービスの質を変える予定です．会員サービスを最大限に利用するためにはホームページにログインすることが必要になります．学会員の皆様におかれましては学会誌が送付される際の宛名の下に印刷された「会員番号」を大切に保管の上，できるだけ速やかにログインできることをご確認くださいますようお願い致します.

なお，会員番号を忘れた場合でも学会のホームページにアクセスしE-mailアドレスを入力すれば自分の会員番号を確認できますが，学会会員名簿に登録されているE-mailアドレスが正しくない場合には再通知されません．その場合にはホームページ右上の「お問合わせ」からその旨お知らせください.

http://js-soilphysics.com/

J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 125, p.1 ～ 2 (2013)

巻 頭 言
Foreword

誰に何をどう見せるか

中辻 敏朗 [1]

小生の職場では，毎年 8 月に「北見農業試験場公開デー」を開催している．この催しの目的は「小中学生や一般市民および農業関係者など地域の皆様に，北見農業試験場の圃場施設や試験研究内容等を公開することにより，北見農業試験場やオホーツク農業に対する理解を深めていただく」と開催要領には記されている．何ともお役所的な文言が並んでいるが，要は大学のオープンキャンパスに類したものとお考えいただければよいかもしれない．

公開デーなので，できるだけ多くの人に来ていただきたい．言葉は良くないが，集客力のある出し物はなんだろうか．まずはなんと言っても食べ物の提供だ．幸い北見農業試験場には小麦，馬鈴しょ，たまねぎの新品種を育成するセクションがあり，素材は豊富にある．そこで，いずれも当場育成の，春まき小麦「はるきらり」を使ったバターロール，ポテトチップ用馬鈴しょ「オホーツクチップ」のポテトチップス，生食用（一般青果用）馬鈴しょ「ゆきつぶら」のふかしいも，多収極早生たまねぎ「収太郎」のオニオンフライの 4 品目を無料試食として提供することにした．

しかし，来場者の方々にお腹を満たして帰っていただくだけでは開催要領に掲げられた本来の目的，つまり，皆さんに「北見農業試験場とオホーツク農業に対する理解を深めていただく」ことが達成できたとは言えない．そこで，試食品と一緒にカラー刷り写真入りの品種解説パンフレットを配布した．また，試食コーナーのテーブル横に数枚の品種解説パネルを展示して，パネル説明担当研究員も配置した．来場者の方々からは担当研究員に対し「試験場っていろいろな作物の品種を開発しているんですね」，「家庭菜園で作りたいのだけど，種いもは手に入るのですか？」，「この品種はどんな料理に向くの？」などの感想や質問が寄せられ，多少なりとも興味を持っていただけたようだ．

公開デーではこの他に，子供向けの遊びコーナー（ここでもちょっと農試っぽく「土で絵を描こう」なんて企画もある），農業に関するクイズに答えて場内を一周するクイズラリー，作物の栽培法や病害虫の悩みに研究員が答える畑作園芸相談コーナー，試験圃場見学バスツアー，農業機械の展示なども行った．

ふたを開けてみると，天候にも恵まれ，11 回目となる今年の来場者は 297 名（うち子供 72 名）で，過去最多となった．来場者の約 4 割にお答えいただいたアンケートによれば，来ていただいた方の職業は，主婦，会社員，幼稚園・小学生，農業，公務員などと幅広く，年齢層は 60 歳以上が 4 割とやや多いものの，10 歳未満から 50 歳代までまさに老若男女にお越しいただいた．来場者の職業や年齢層がもっと限定されれば，出し物の内容も絞り込める可能性はあるが，このような現状なので，どうしても万人受けする総花的な内容にならざるを得ない．対象者をあまり狭く限定せずに，北見農試の成果やオホーツク農業の現状をどう見せるか，これが非常に難しい．

藤沢晃治氏の著書『「分かりやすい表現」の技術（講談社ブルーバックス）』には，意図したことを適切に伝える（見せる）ための 16 のルールが解説されている．そのうち，「受け手のプロフィールを設定せよ」，「受け手の熱意を見極めよ」，「大前提の説明を忘れるな」，「欲張るな．場合によっては詳細を捨てよ」，「情報に優先順位をつけよ」とのルールは，対象者のバックグラウンドや関心の程度を明確に想定し，精選された情報をうまく並べて見せることの大切さ

Photo. 1 試食品提供の様子（北見農試公開デー）．

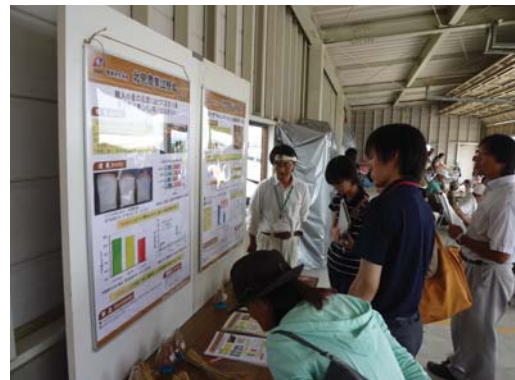



Photo. 2 品種解説パネルと研究員による説明（同）．

[1] 北海道立総合研究機構北見農業試験場

を指摘している．一方，公開デーでは，大人から子どもまで，専門家から初心者までを対象に，広く浅く（もちろん深い方が良いが）農試の仕事を見せることが使命なので，これらのルールを当てはめにくい．

小生が会誌「土壌の物理性」の編集委員長を拝命した過去 2 カ年においても，誌上で誰を対象に何をどのように見せるか，大いに悩んだ．当時は投稿論文数が減少傾向にあったため，編集委員会や事務局での論議に基づき，多くの方々にご協力いただきながら，依頼原稿を中心とした特集をいくつか企画し，土壌物理に少しでも関連することならば，できるだけ幅広くいろいろな情報を掲載する（見せる）ことを試みた．元来，土壌物理学会は土壌肥料学会，農業土木学会（現農業農村工学会）の研究者を中心に，1958 年に発足した土壌物理研究会がルーツであり，農学，工学，環境科学，気象学など多様なバックグラウンドを持つ人達の集まりである．したがって，先ほどの藤沢氏の指摘はもっともであるが，対象や内容をはじめからあまり狭めることなく，ゆるい縛りで，多様な人向けの情報をたくさん掲載する（見せる）ことが，和文誌としての「土壌の物理性」の良さの発揮につながるのではないかと考えた訳である．

ただし，「見せる」の意味を愛用する新明解国語辞典（三省堂）で引いてみたところ，「どうすればうまく出来るかということを実際に演技してのける」とあるのを見つけた．なんと恐ろしい意味だろう．「実際に演技してのけ」られたかどうかは，後々の皆さんのご判断にゆだねたい．それにしても，この巻頭言もそうだが，誰に何をどう見せるかは実に難しく，勉強の連続であることを痛感している．

J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 125, p.3 ~ 15 (2013)

論　文
Original Paper

Estimating the unsaturated hydraulic conductivity of Andisols using the evaporation method

RUDIYANTO[1], Nobuo TORIDE[2], Masaru SAKAI[2] and Martinus Th. van GENUCHTEN[3]

Abstract: Parameters of the bimodal van Genuchten (VG) hydraulic functions for two aggregated Andisols were inversely determined using the evaporation method. Initial estimates of the water retention parameters were determined from separate retention measurements, which facilitated rapid convergence of the parameter optimization process regardless of the number of optimized parameters. When the bimodal water retention parameters were fixed according to the independently measured retention data from near saturation to very low pressure heads down to -10^5 cm, it was possible to estimate the unsaturated hydraulic conductivity, $K(h)$, by optimizing only two conductivity parameters (K_s, ℓ). Since the flat region of the bimodal retention curve at intermediate pressures is difficult to measure precisely, however, we still recommend optimizing all bimodal VG parameters to yield the best overall results. Including water retention data at very low pressure heads in the dry range extended the applicable range of the model predictions, at least down to pressure heads of approximately -10^4 cm.
Key Words : unsaturated hydraulic conductivity, water retention curve, aggregated soil, Andisol, evaporation method

1. Introduction

Andisols generally are developed from volcanic ash consisting of noncrystalline materials such as allophone, imogolite, Al-humus complexes, and ferrihydrite (Shoji et al., 1993; Nanzyo, 2002). Andisols cover 17 % of the land surface in Japan, where they are widely used for agriculture. Water flow and solute transport processes in Andisols are of considerable interest because of their unique physical and chemical properties. They typically have a very low bulk density and a well-developed aggregated structure. Because of this, Andisols usually exhibit a composite (stepwise) water retention function reflecting distinct but interacting inter-aggregate and intra-aggregate pore regions (Miyamoto et al., 2003).

Several bimodal or multimodal functions have been proposed over the years to account for the additive effects of inter- and intra-aggregate pore regions to the overall soil hydraulic properties (Peters and Klavetter, 1988; Othmer et al., 1991; Gerke and van Genuchten, 1993, Mallants et al., 1997; Mohanty et al., 1997). One frequently used multimodal formulation stems from Durner (1992, 1994) who developed a composite retention function by summing multiple van Genuchten (VG) models (van Genuchten, 1980). The bimodal form of this function has been used in several recent studies (e.g., Coppola, 2000; Peters and Durner, 2008; Schelle et al., 2010), including for the water retention properties of Andisols (Miyamoto et al., 2003; Hamamoto et al., 2009; Chamindu Deepagoda et al., 2012). Most of these studies were concerned with the water retention properties of soils. By comparison, very few studies have applied the bimodal VG model to the unsaturated hydraulic conductivity function of aggregated soils. When used also for the hydraulic conductivity, most applications were concerned with improved descriptions of the unsaturated conductivity function near saturation in attempts to account for the effects of macropores or rock fractures (Peters and Klavetter, 1988; Zurmühl and Durner, 1998; Iden and Durner, 2007; Durner and Iden, 2011).

The bimodal VG model has considerable flexibility in describing the hydraulic properties of aggregated media. Unfortunately, optimization of the large number of parameters in the model against transient flow data (such as from multistep outflow or evaporation methods) is a major challenge. Since several of the hydraulic parameters are often correlated (Zurmühl and Durner, 1998), it is inherently difficult to find the global minimum of the objective function in the optimization process. Zurmühl and Durner (1998) showed that convergence of the parameter optimization process depends very much on the initial estimates of the unknown parameters. In addition to the transient measurements, the objective function could also include independently measured soil water retention or unsaturated hydraulic conductivity data points. Parameter uncertainty

[1]Dept. of Civil and Environmental Engineering, Bogor Agricultural Univ., Indonesia.
[2]Graduate School of Bioresources, Mie Univ., Tsu, Mie 514-8507, Japan.
Corresponding authour:取出伸夫, 三重大学大学院生物資源学研究科
[3]Dept. of Mechanical Engineering, Federal University of Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.
2013 年 9 月 3 日受稿　2013 年 9 月 20 日受理

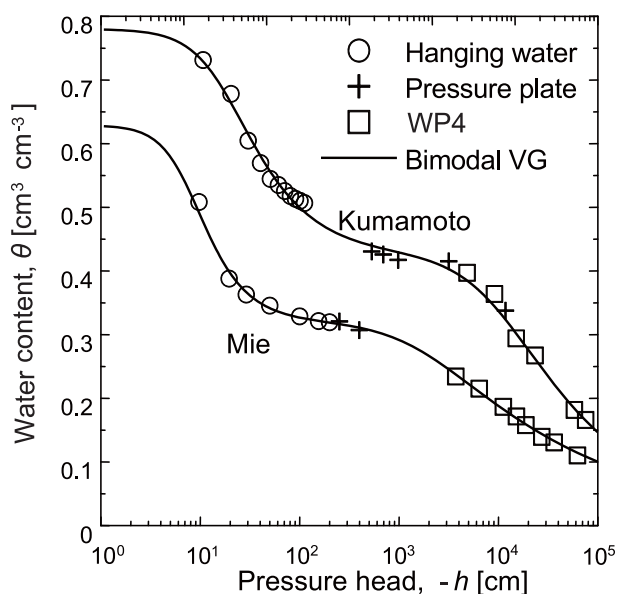



Fig. 1 Water retention curves for the Kumamoto and Mie Andisols fitted with the bimodal VG model (solid line). Retention data were obtained with a hanging water column (open circles), a pressure plate (crosses), and a WP4 dewpoint potentiameter (open squares).

(i.e., the reliable range of the optimized parameter values) generally will be reduced by including independently measured soil hydraulic property data in the objective function, but this may affect the goodness of fit between modeled and experimental data (Šimůnek et al., 1998; Hopmans et al., 2002). More rapid minimization of the objective function may be achieved by using as initial estimates water retention parameters fitted to observed retention data. For example, Spohrer et al. (2006) succeeded in estimating 25 parameters of the bimodal VG model for four soil layers of a tropical Acrisol from transient field data using initial values of the fitted water retention parameters.

When the hydraulic properties are estimated inversely using the evaporation method, the optimized hydraulic functions are generally assumed to be representative only within the range of the tensiometer data. No guarantee exists that the hydraulic functions can be extrapolated beyond the invoked pressure measurement range. Šimůnek et al. (1998) and Hopmans et al. (2002) suggested the applicable range of the model predictions could be extended by including independently measured hydraulic data in the objective function. Sakai and Toride (2007b) estimated the unsaturated conductivity of the model of Fayer and Simmons (1995) for a dune sand, as well as the bimodal VG model for an Andisol, using the evaporation method in combination with water retention data from close to saturation to very dry conditions down to pressure heads of approximately -10^5 cm. They showed that the observed pressure heads agreed well with the model predictions when an appropriate hydraulic function was used to describe the water retention data over a wide range of pressure heads. The validity of the estimated unsaturated hydraulic conductivity beyond the pressure measurement range, however, was not discussed in detail in their study.

The objective of this study was to determine parameters of the bimodal VG model for Andisols over a wide range of pressure heads as determined using the evaporation method. In addition to the pressure heads we also used water retention data in the objective function. The saturated hydraulic conductivity, K_s, and the pore-connectivity factor, ℓ, in the VG hydraulic conductivity function, along with several water retention parameters, were optimized. Different sets of optimizations were conducted by restricting the pressure head range of the water retention and tensiometer measurements in the objective function. We were especially interested in the role of water retention data at very at low (negative) pressure heads in the objective function. We furthermore used the measured pressure head profiles of the samples at the end of the evaporation experiment to confirm the shape of the estimated hydraulic functions beyond the tensiometer measurement range.

2. Material and methods

2.1 Evaporation experiment

For the evaporation experiments we used two different Japanese Andisols collected from the surface horizons of two sites. One set of soil samples was obtained from the NARO Kyushu Okinawa Agricultural Research Center in Kumamoto, and one from the NARO Institute of Vegetable and Tea Science in Mie, Japan. Collected soil samples were sieved using a 2 mm mesh. The disturbed Andisols were packed uniformly in 16-cm long, 3.8-cm diameter acrylic columns to bulk densities, ρ_b, of 0.48 and 0.75 g cm^{-3} for the Kumamoto and Mie soils, respectively. The saturated hydraulic conductivity, K_s, based on the falling head method was estimated to be approximately 200 cm d^{-1} for the Kumamoto Andisol, and 1000 cm d^{-1} for the Mie Andisol. Fig. 1 shows water retention curves as measured using a hanging water column for the pressure head (h) range $-200 < h < -5$ cm, using a pressure plate for $-1.2 \times 10^4 < h < -250$ cm, and a WP4 dew point potentiameter (Decagon Devices, Pullman, WA) based on relative humidity measurements equilibrated with the soil water pressure for the range $-10^5 < h < -3 \times 10^3$ cm. Although WP4 measurements are generally used for pressure heads below -10^4 cm, we applied the WP4 potentiameter to the higher pressure heads up to approximately -3×10^3 cm with considerable care as suggested by Maček et al. (2013). Volumetric water contents for the WP4 measurements were determined from the gravimetric water contents and the bulk density of the soil.

After slowly saturating the soil samples from the bottom, the water supply was closed and evaporation was al-

low to start using a fan to blow air away from the soil surface in a 25 °C constant temperature room. Pressure heads were monitored using five tensiometers connected to pressure transducers at 1, 2, 3, 5 and 10 cm depths. Cumulative amounts of evaporation were calculated from measurements of the soil column weights using an electrical balance connected to a data logger. The evaporation experiment for the Mie Andisol continued until the pressure head became less than −600 cm at 1 cm depth. The evaporation period for the Kumomoto Andisol was allowed to continue longer, until the pressure head at 10 cm depth became less than −500 cm. The valves connected to the tensiometers above 10 cm depth were closed at h values of about −500 cm to prevent water leakage from the tensiometer cups (Durner and Or, 2005; Schindler et al., 2010). Volumetric water content profiles at the end of experiments were determined gravimetrically by sectioning the soil columns. Pressure head profiles near the surface at the end of experiments for the Kumamoto Andisol were measured using the WP4 potentiameter.

2.2 Bimodal van Genuchten model

The bimodal water retention (Durner, 1992, 1994) and unsaturated hydraulic conductivity (Priesack and Durner, 2006) functions based on the van Genuchten-Mualem model (van Genuchten, 1980; Mualem, 1976) were used to describe the hydraulic properties of the two Andisols:

$$S=\frac{\theta(h)-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=\sum_{i=1}^{2}w_iS_i \quad (1)$$

where S_i is given by:

$$S_i=\left[1+(\alpha_i|h|)^{n_i}\right]^{-m_i} \quad (2)$$

$$K(h)=K_s\left(\sum_{i=1}^{2}w_iS_i\right)^{\ell}\times\left\{\frac{\sum_{i=1}^{2}w_i\alpha_i\left[1-\left(1-S_i^{1/m_i}\right)^{m_i}\right]}{\sum_{i=1}^{2}w_i\alpha_i}\right\}^2 \quad (3)$$

The subscript i in these equations represents the number of subregions (i = 1, 2 in our application), S_i is effective saturation [−] of the i-th subregion, h is the soil water pressure head [L], θ is the volumetric water content [L^3L^{-3}], θ_s and θ_r are the saturated and residual water contents [L^3L^{-3}], respectively, n_i [-], α_i [L^{-1}], and m_i ($=1-1/n_i$) are shape parameters subject to $\alpha_i>0$ and $n_i>1$, w_1 and w_2 are the weighing factors subject to $0<w_i<1$ and $w_1+w_2=1$, K is the hydraulic conductivity [LT^{-1}], K_s is the saturated hydraulic conductivity [LT^{-1}], and ℓ is a pore-connectivity coefficient [-]. The S_1 variable (subject to $\alpha_1>\alpha_2$) is associated with the first subregion of $\theta(h)$ at the higher water contents, while S_2 corresponds to the second subregion at the lower water contents. The hydraulic functions given by Eqs. (1) to (3) are further referred to here as the bimodal VG model. Note that the hydraulic functions contain a total of nine parameters. Seven of these parameters (θ_s, θ_r, α_1, n_1, w_2, α_2, n_2) relate primarily to the water retention curve, and two additional parameters (K_s, ℓ) to the unsaturated hydraulic conductivity function.

2.3 Parameter optimization

Parameters of the bimodal VG model for our two Andisols were optimized using version 4.08 of the HYDRUS-1D software package (http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?hydrus-1d) of Šimůnek et al. (2008). The calculations assumed applicability of the Richards equation to one-dimensional vertical water flow under isothermal condition as follows:

$$\frac{\partial\theta(h)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left(K(h)\frac{\partial h}{\partial z}+K(h)\right) \quad (4)$$

where z is the vertical coordinate [L] positive upward, and t is time [T].

The initial and boundary conditions for the evaporation experiment are given by (e.g., Šimůnek et al., 1998):

$$h(z,0)=h_i(z) \quad (5)$$

$$-K(h)\left(\frac{\partial h}{\partial z}+1\right)=q_{evap}(L,t) \quad (6)$$

$$q(0,t)=-K(h)\left(\frac{\partial h}{\partial z}+1\right)=0 \quad (7)$$

where $h_i(z)$ is the initial pressure head [L] distribution in the column, $q_{evap}(t)$ is the time-variable evaporation rate [LT^{-1}] at the soil surface, and L is the z coordinate of the soil surface [L]. The initial condition, $h_i(z)$, was linearly interpolated using the initial tensiometer readings, while $q_{evap}(t)$ was described with a polynomial function fitted to the observed evaporation rate as shown in Fig. 2. A no-flow boundary condition was imposed at the bottom boundary. We note that vapor flow was not included in the flow model, thus assuming that the effects of vapor flow

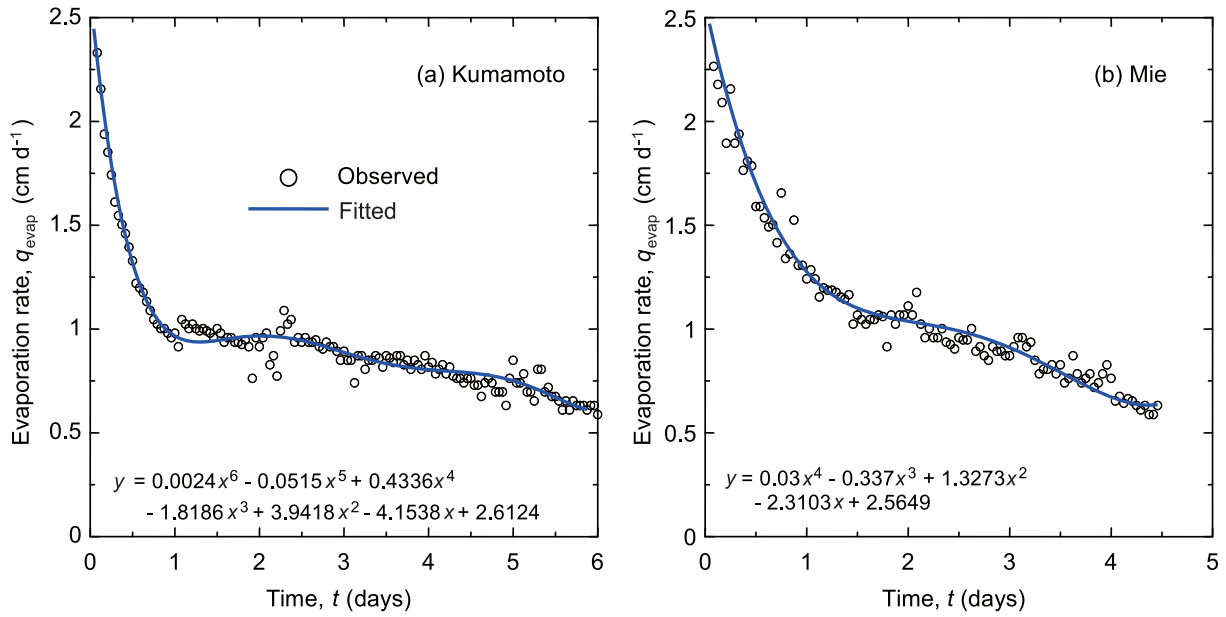



Fig. 2 Evaporation rate from the surface of the Kumamoto (a) and Mie (b) Andisol soils samples. Sown are the observed evaporation rate data (open circles) and the fitted polynomial equation (solid line).

on the parameter optimization process using the evaporation method can be neglected (Sakai and Toride, 2007b).

The objective function, Φ, to be minimized during the parameter estimation process consisted of pressure heads measured at several depths as well as the independently measured water retention data shown in Fig. 1 (Hopmans et al., 2002; Šimůnek et al., 2008):

$$\Phi = v_h \sum_{i=1}^{n_h} \left[h_{obs}(t_i) - h_{fit}(t_i)\right]^2 + v_\theta \sum_{i=1}^{n_\theta} \left[\theta_{obs}(h_i) - \theta_{fit}(h_i)\right]^2 \quad (8)$$

where n_h and n_θ are the number of observed pressure heads (in the column) and independently measured water retention data, respectively, $v_h = 1/(n_h \sigma_h^2)$ and $v_\theta = 1/(n_\theta \sigma_\theta^2)$ are weights for each data type (in which σ is the variance of the observed data), while the subscripts obs and fit indicate observed and model fitted values, respectively, at time t_i.

Šimůnek et al. (1998) recommended including the final water content of the evaporation experiment in the objective function in order to anchor the retention curve along the θ axis. Instead of including the final water content in the objective function, we fixed the value of θ_s by applying a mass balance to the column. The value of θ_s was estimated from the final water content of the column and the cumulative amount of evaporation during the evaporation experiment as determined from the loss of weight of the sample after the experiment. Estimates of the remaining water retention parameters (θ_r, α_1, n_1, w_2, α_2, n_2) in Eqs. (1) to (3) were determined first from the observed water retention data in Fig. 1 using version 6.02 of the RETC code (http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?retc) of van Genuchten et al. (1991). In order to reduce the number of optimized parameters, the value of θ_r was assumed to be zero for our two Andisols since we found that optimization of θ_r did not improve the fit of the data in Fig. 1. We similarly found that the restrictions $m_i = 1 - 1/n_i$ in the bimodal VG model did not affect the goodness of fit. Fig. 1 shows excellent visual matches of the bimodal VG soil water retention functions to the data.

Following Spohrer et al. (2006) and Sakai and Toride (2007b), the fitted retention parameter values were used next as initial estimates in the overall optimization of the evaporation experiment. In our study we optimized the hydraulic conductivity parameters K_s and ℓ since these two parameters are generally difficult to measure directly. The initial value for K_s was fixed at the value obtained with the falling head method, while ℓ was initially assumed to be 0.5 as suggested by Mualem (1976). The values of θ_s and K_s in an evaporation experiment may be slightly different from observed static water retention measurements and the falling head method because of entrapped air during saturation or the length of soil column used (Hopmans and Dane, 1986; Dane and Hopmans, 2002; Sakaguchi et al., 2005). The value of K_s can easily change with very small

Table 1 Values of the optimized hydraulic parameters of the bimodal VG model, and their standard errors (SE) and coefficients of variation (CV), obtained with the evaporation method for cases 1, through 7 of the Kumamoto and Mie Andisols.

Case	θ_r	θ_s	α_1	n_1	K_s	ℓ	w_2	α_2	n_2
	(cm^3 cm^{-3})		(cm^{-1})	(-)	(cm d^{-1})	(-)	(-)	(cm^{-1})	(-)
Kumamoto									
initial	0	0.78	0.057	1.88	200	0.5	0.544	0.00011	1.44
1	-	-	-	-	703	0.751	-	-	-
SE	-	-	-	-	11	0.107	-	-	-
CV	-	-	-	-	0.016	0.142	-	-	
2	-	-	0.045	1.92	312	0.054	0.544	-	-
SE	-	-	0.001	0.03	26	0.022	0.003	-	-
CV	-	-	0.022	0.015	0.083	0.418	0.005	-	-
3	-	-	0.044	1.96	343	0.436	0.549	0.00013	1.39
SE	-	-	0.001	0.03	32	0.214	0.003	0.00001	0.02
CV			0.023	0.017	0.093	0.492	0.006	0.076	0.011
4	-	-	0.055	1.87	312	0.614	0.541	0.00025	1.55
SE	-	-	0.001	0.04	38	0.231	0.008	0.00006	0.31
CV	-	-	0.018	0.020	0.122	0.377	0.014	0.232	0.203
5	-	-	-	-	971	2.301	-	-	-
SE	-	-	-	-	18	0.227	-	-	-
CV	-	-			0.019	0.099	-	-	-
6	-	-	-	-	208	0.007	-	-	-
SE	-	-	-	-	42	0.016	-	-	-
CV	-	-	-	-	0.202	2.167	-	-	-
7	-	-	-	-	28	0.001	-	-	-
SE	-	-	-	-	6	0.012	-	-	-
CV	-	-	-	-	0.214	15.250	-	-	-
Mie									
initial	0	0.629	0.129	2.41	1000	0.5	0.509	0.00062	1.28
1	-	-	-	-	969	0.040	-	-	-
SE	-	-	-	-	66	0.016	-	-	-
CV	-	-	-	-	0.068	0.389	-	-	-
2	-	-	0.101	4.36	968	0.044	0.532	-	-
SE	-	-	0.002	0.06	50	0.006	0.003	-	-
CV	-	-	0.020	0.013	0.052	0.145	0.005	-	-
3	-	-	0.111	3.57	555	0.011	0.545	0.00125	1.25
SE	-	-	0.002	0.07	34	0.004	0.003	0.00009	0.01
CV	-	-	0.018	0.020	0.061	0.381	0.005	0.072	0.005
4	-	-	0.131	2.42	507	0.330	0.513	0.00072	1.74
SE	-	-	0.002	0.04	176	0.608	0.002	0.00004	0.07
CV	-	-	0.015	0.016	0.347	1.844	0.005	0.056	0.043
5	-	-	-	-	850	0.620	-	-	-
SE	-	-	-	-	223	0.378	-	-	-
CV	-	-	-	-	0.262	0.610	-	-	-
6	-	-	-	-	617	0.407	-	-	-
SE	-	-	-	-	39	0.059	-	-	-
CV	-	-	-	-	0.063	0.145	-	-	-
7	-	-	-	-	391	0.018	-	-	-
SE	-	-	-	-	22	0.014	-	-	-
CV	-	-	-	-	0.056	0.765	-	-	-

Note: Entries indicated by- were not included in the optimization but fixed at the initial values

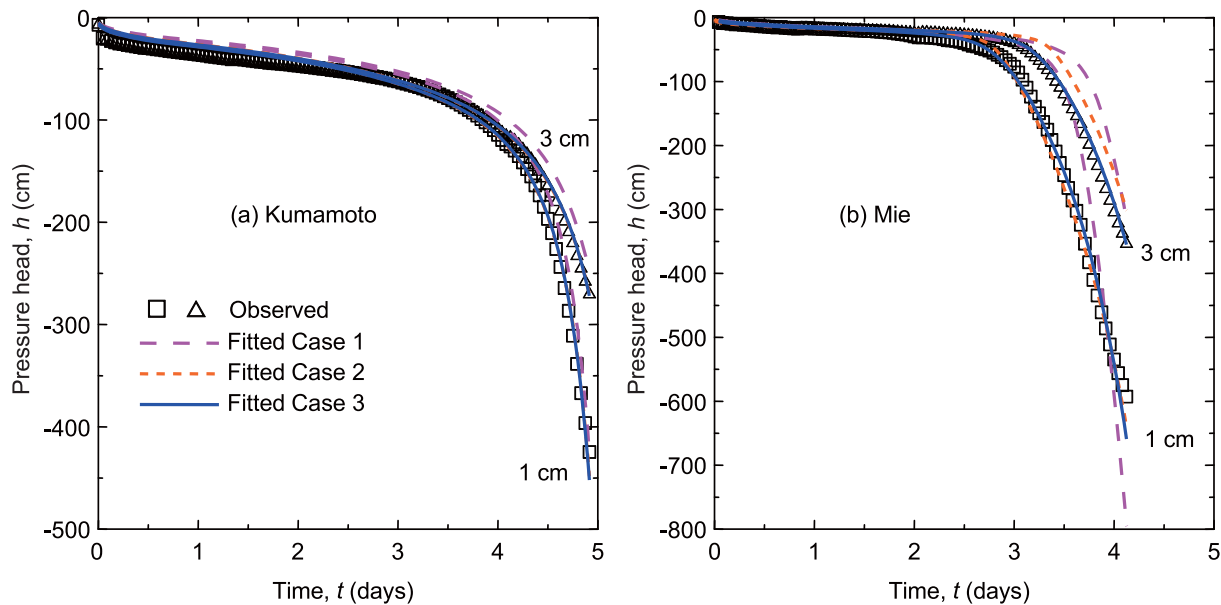



Fig. 3 Observed and fitted pressure heads as a function of time for the Kumamoto (a) and Mie (b) Andisols. Case 1 (long dash line), case 2 (short dash line) and case 3 (solid line).

variations in θ_s. Since Andisols have a large porosity (especially the Kumamoto soil in our study), direct measurement of saturation can be quite vulnerable also to small measurement errors. Since we fixed θ_s based on water mass balances of the sample, K_s is probably best treated as fitting parameter in the evaporation method. Initial values of all of the parameters used in the optimizations for the two Andisols are listed in Table 1.

We optimized the K_s and ℓ values for three cases involving different combinations with the water retention parameters: (1) only two hydraulic conductivity parameters (i.e., K_s, ℓ) while keeping the water retention parameters fixed according to the independently measured water retention functions, (2) adding the water retention parameters of the first subregion (i.e., K_s, ℓ, α_1, n_1, w_2) in the optimization, and (3) further including the retention parameters of the second subregion (i.e., K_s, ℓ, α_1, n_1, w_2, α_2, n_2). The values of θ_s and θ_r (= 0) remained fixed in all optimizations.

3. Results and discussion

3.1 Parameter estimation

In earlier work, Šimůnek et al. (1998) showed that a single set of tensiometer readings near the sample surface was sufficient to yield accurate estimates of the soil hydraulic parameters using the evaporation method. Our experiments confirmed this in that similar results were obtained irrespective of including pressure head data from points deeper in the columns. Sakai and Toride (2007a) found that using pressure heads at two different depths in the objective function produced smaller standard errors for K_s and ℓ than when data from only one depth were used. Since K_s and ℓ were our primary concern, we will show below results when using pressure heads at 1 and 3 cm depths in the objective function given by Eq. (8). Still, obtaining additional tensiometer measurements at other depths may well be useful for backup information in case some of tensiometers failed to work properly (Hopmans et al., 2002).

Fig. 3 shows fitted and observed pressure heads as a function of time at the 1 and 3 cm depths for the Kumamoto and Mie Andisols. Estimated water retention and unsaturated hydraulic conductivity functions corresponding to the three optimization cases of our study are shown in Fig. 4. The optimized parameter values and their standard errors, as well as the coefficients of variations (defined as the optimized values divided by the standard errors) for the bimodal VG model are listed in Table 1.

For the Kumamoto Andisol, all three optimization scenarios (i.e., case 1 with (K_s, ℓ) optimized, case 2 with (K_s, ℓ, α_1, n_1, w_2) optimized, and case 3 with (K_s, ℓ, α_1, n_1, w_2, α_2, n_2) optimized) gave almost identical results. All three cases produced excellent agreement with the observed pressure heads at the 1 and 3 cm depths (Fig. 3a). Predicted pressure heads for cases 2 and 3 were almost identical. The three cases also produced close agreement with the observed water retention data (Fig. 4a). In fact, as shown in Fig. 4b, the estimated hydraulic con-

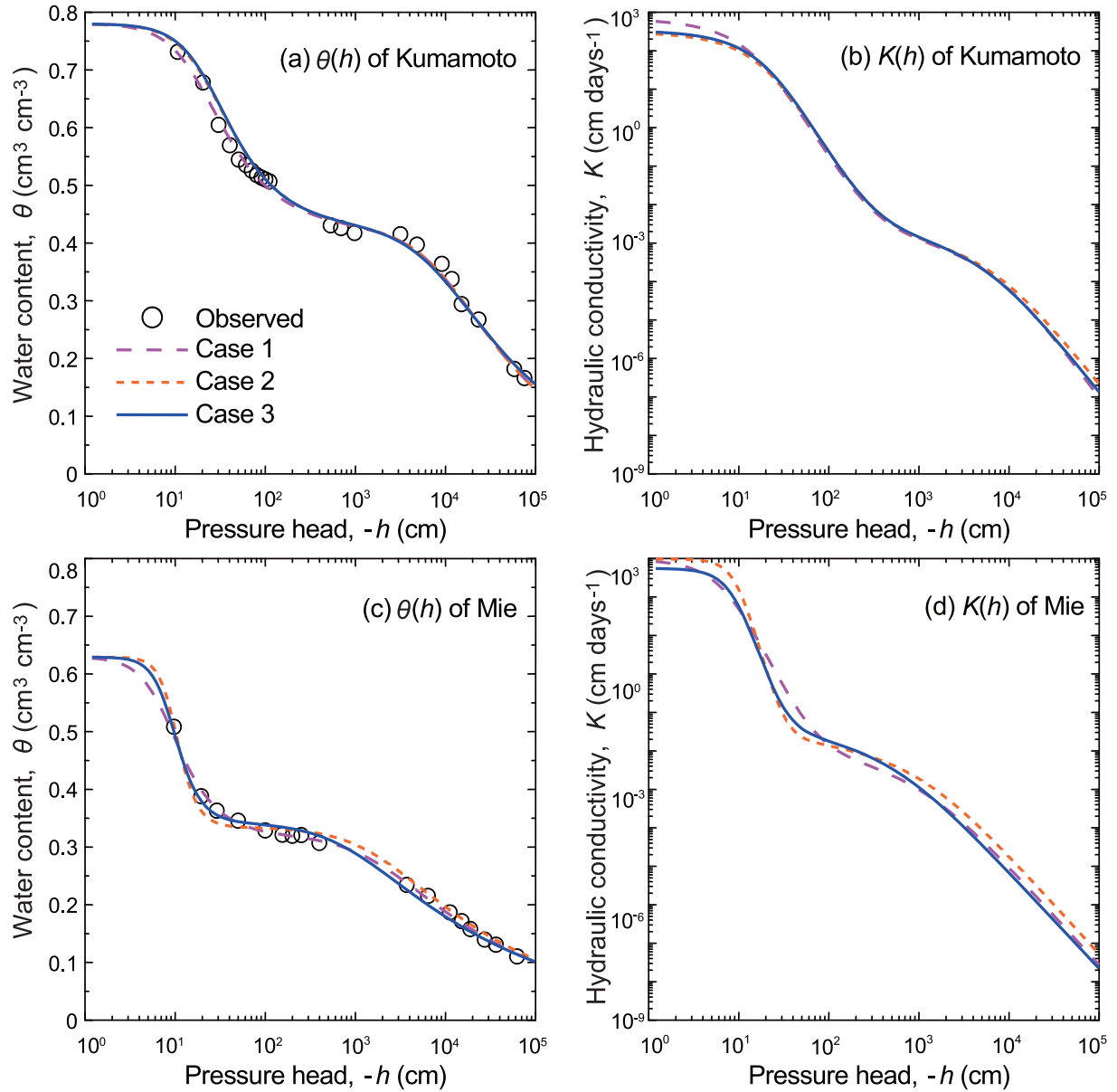



Fig. 4 Estimated water retention (a, c) and unsaturated hydraulic conductivity (b, d) curves for the Kumamoto (top) and Mie (bottom) Andisols: case 1 (long dash lines), case 2 (short dash lines) and case 3 (solid lines).

ductivities were almost identical for all three Kumamoto optimizations. In addition, all of the optimized parameters had small standard errors as reflected by the narrow confidence intervals shown in Table 1. These results suggest that when reliable water retention data are available and used in the objective function, it is possible to predict $K(h)$ by optimizing only the two conductivity parameters (K_s, ℓ). This implies that as long as the water retention parameters can be properly determined using observed water retention data, the number of parameters in Mualem-type soil hydraulic functions, even for the bimodal VG model as given by Eq. (3), should not pose a problem in the optimization.

Results for the Mie Andisol were different. Case 1 for this soil failed to fit the sudden pressure drop at $h = -50$ cm after about 3.5 days in Fig. 3b, with the fitted pressure heads being greater than the observations. Cases 2 and 3 improved the agreement between observed and fitted pressure heads. As the number of optimized parameter increases, the bimodal VG model clearly has more flexibility in fitting the pressure head data. Improved fitting of the pressure head data could be achieved also by sacrificing the close fit of the water retention data. However, compared to the differences between the fitted and observed pressure heads in Fig. 3b, the fitted water retention curves in Fig. 4c were very similar for all three cases. The bimodal water retention curve of Fig. 4c has a relatively flat region between about -50 cm and -10^3 cm. Since the soil water capacity ($d\theta/dh$) is small in that flat region, the abrupt pressure drop below $h = -50$ cm in Fig. 3b should not change the water content very much. This ex-

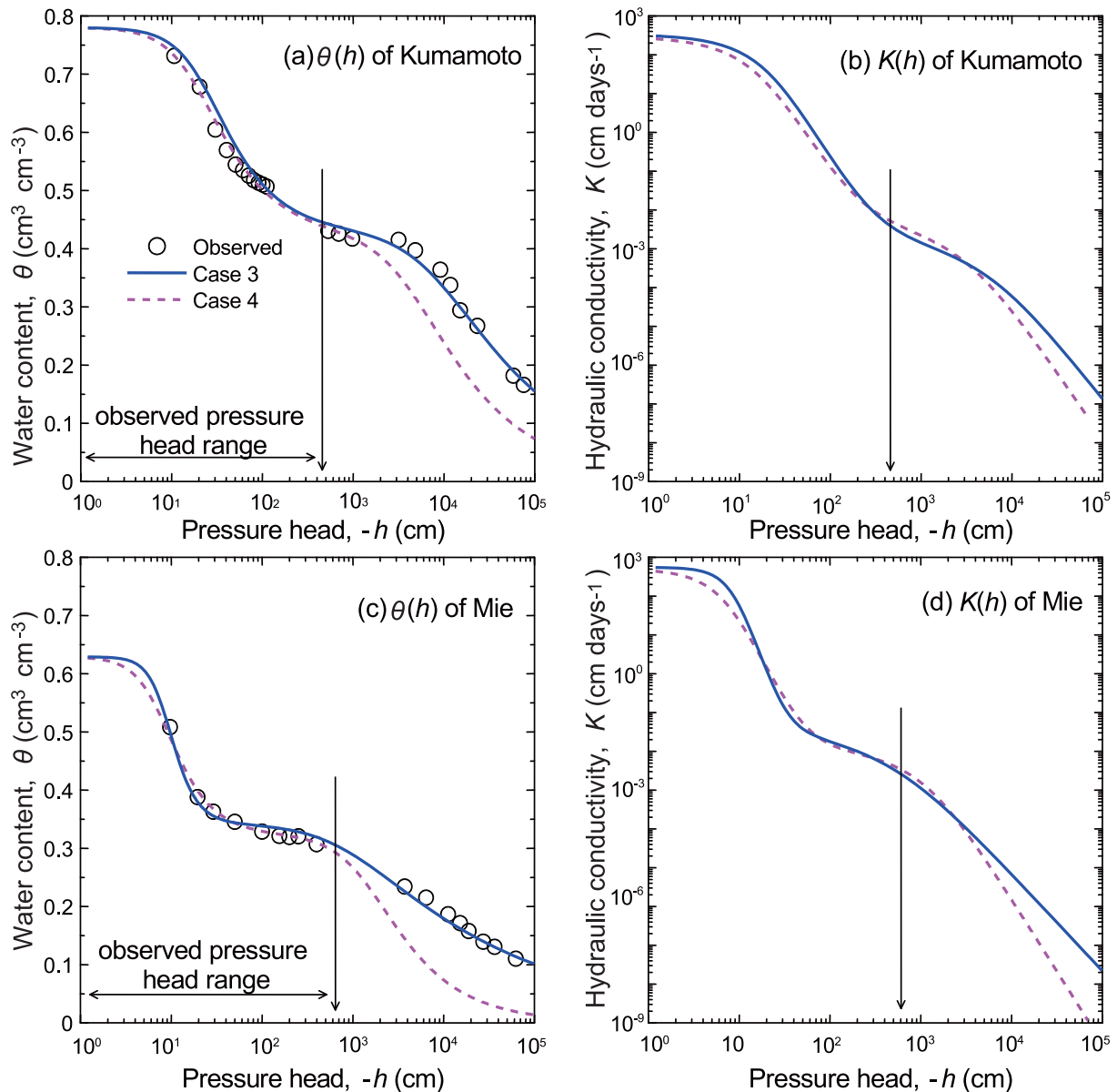



Fig. 5 Estimated water retention (a, c) and unsaturated hydraulic conductivity (b, d) curves for the Kumamoto (top) and Mie (bottom) Andisols. Results were obtained with (solid lines) and without (dashed lines) including water retention data at the low pressure heads in the objective function.

plains why the small change in the water retention curve obtained by additionally optimizing the first subregion retention parameters (α_1, n_1, w_2) still produced a significant improvement in the pressure head simulations. By comparison, the pressure range of the flat region of the Mie Andisol is wider and the soil water capacity smaller than of the Kumamoto Andisol (Fig. 4a versus and 4c). We emphasize that the discrepancies in the pressure head were apparent when optimizing only the conductivity parameters (case 1), and then only for the Mie Andisol, but not for the Kumamoto soil.

We also note that measurements of water retention data in the flat part of the retention function are often subject to errors. It is not easy to precisely determine the water content and pressure head relationships when the soil water capacity is very small. Pressure plates are generally used to measure water retention in this region. Nonequilibrium conditions, poor contact between the soil sample and the plate (Cresswell et al., 2008; Bittelli and Flury, 2009), and hysteresis in the sample preparation often affect the measurements. For this reason it may be better to optimize at least the first subregion parameters (α_1, n_1, w_2) also. But as long as water retention data over a wide range of pressure heads are available and can be used in the objective function, as Durner (1994) also suggested, case 3 optimization should yield the best overall results.

We mention some concern about the value of the pore-connectivity coefficient, ℓ, which is often fixed at 0.5 fol-

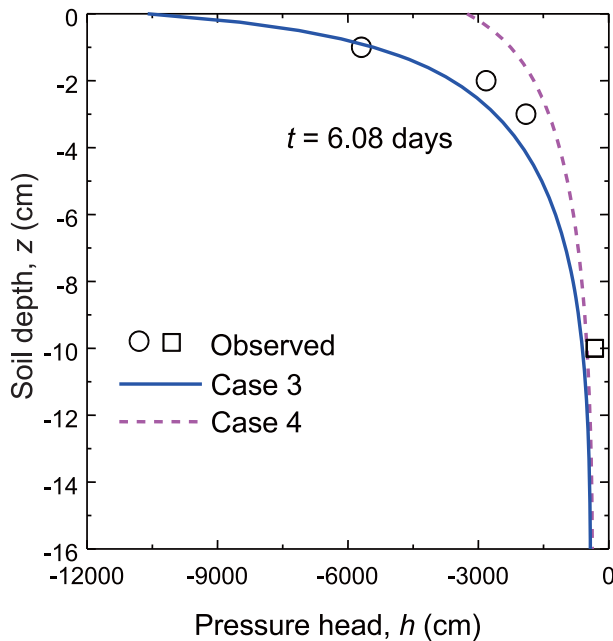



Fig. 6 Observed and predicted pressure head profiles after 6.08 days for the evaporation experiment of the Kumamoto Andisol. Results were obtained with (solid lines, case 3) and without (dashed lines, case 4) including water retention data at the low pressure heads in the objective function. Circles represent WP4 data and the square a tensiometer datum.

lowing Mualem (1976). As pointed out in several studies (e.g., Wösten and van Genuchten, 1988; Kaveh and van Genuchten, 1992; Schaap and Leij, 2000; Spohrer et al., 2006), ℓ can be quite variable depending upon soil type. Using the case 3 optimization, ℓ was found to be 0.436 for the Kumamoto Andisol and 0.011 for the Mie Andisol. More data are clearly needed to obtain a better definition of possible ℓ values for Andisols.

Our parameter optimizations were found to converge quickly, in all cases less than 10 iterations (5, 8 and 8 iterations for cases 1 to 3, respectively, of the Kumamoto Andisol and 8, 9 and 9 iterations for cases 1 to 3 of the Mie Andisol). This included case 3 which had the largest number of optimized parameters. Our results suggests that using water retention parameters fitted to independently observed retention data as initial estimates will facilitate convergence.

3.2 Water retention data at low pressure heads

In addition to the pressure head measurements obtained during the evaporation experiments for $h > -600$ cm, we included in the objective function thus far also all of the independently measured water retention data between -10^5 and -5 cm (Fig. 1). This is to obtain reliable estimates of $K(h)$ in the low pressure head range as recommended by Šimůnek et al. (1998) and Hopmans et al. (2002). To test the need for retention data in the dry range, we compared hydraulic functions optimized with (case 3) and without (case 4) including the independent water retention data at the low pressure heads in the objective function. The optimized conditions for case 4 were the same as for case 3, including the initial estimates, except that case 4 considered only water retention data for $h > -10^3$ cm. The estimated parameter values for case 4 are also listed in Table 1. For both Andisols, good agreement between the observed and fitted pressure heads in the columns was obtained, very similar to case 3 as shown in Fig. 3.

Fig. 5 shows the observed and fitted water retention curves and the estimated unsaturated hydraulic conductivity functions for cases 3 and 4. The observed water retention data in the dry range were severely underestimated using case 4 relative to case 3. Since no information was given for $h < -10^3$ cm for the case 4 optimizations, it is not surprising that this case converged to different values of the second subregion parameter (α_2, n_2). The discrepancies shown in Fig. 5 for case 4 are a reason why optimized hydraulic functions are generally assumed to be reliable only within the range of the tensiometer measurements (Šimůnek et al., 1998; Hopmans et al., 2002). Table 1 shows that most of the standard errors of the estimated parameters for case 3 were smaller than those for case 4, which indicates that including water retention data at the lower pressure heads in the objective function will reduce parameter uncertainty and lead to more reliable parameter values.

Although observed pressure head data over a 5-day period were used for parameter optimization of the Kumamoto Andisol (Fig. 3a), the evaporation experiments continued for 6.08 days until the pressure heads at 10 cm depth reached approximately -500 cm. To confirm the accuracy of the hydraulic properties of cases 3 and 4 for the Kumamoto Andisol, pressure heads were simulated for a longer time period using case 3 and 4 properties. Fig. 6 shows observed WP4 data near the surface with one tensiometer datum at the 10-cm depth, and predicted final pressure head profiles after 6.08 days. The simulation using case 3 parameters agreed well with the observed pressure profile near the surface, whereas the prediction using case 4 parameters overestimated the pressure heads. These

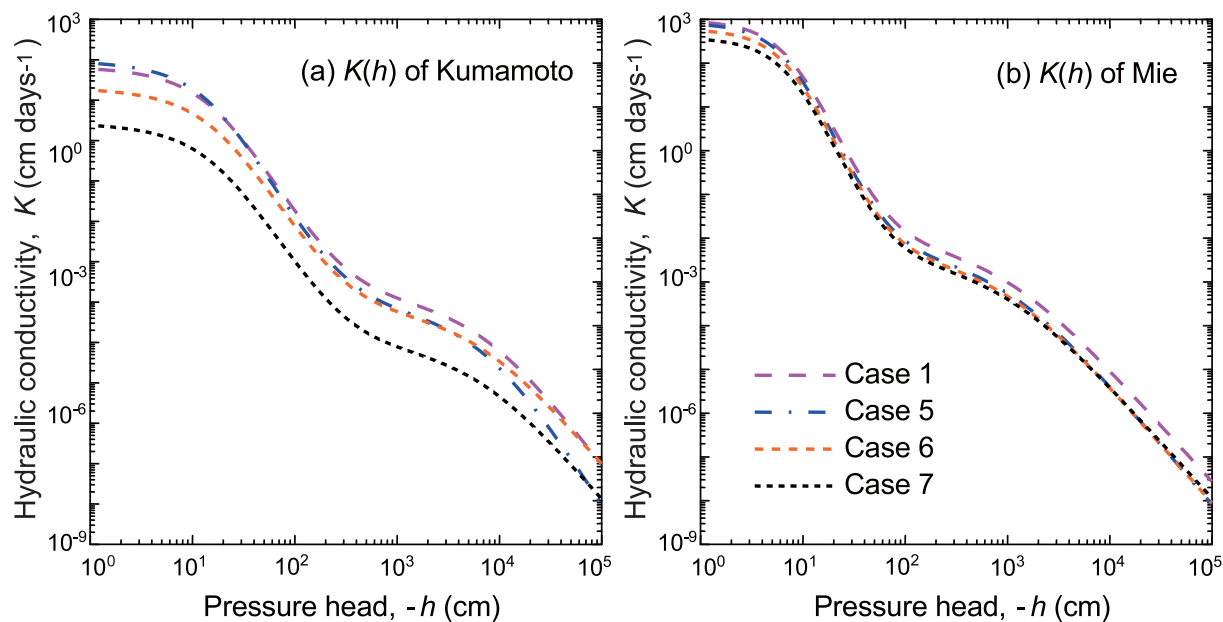



Fig. 7 Impacts of the pressure head range in the objective function on the estimated unsaturated hydraulic conductivity for the Kumamoto (a) and Mie (b) Andisols: case 1 used all data, case 5 only $h > -200$ cm, case 6 only $h > -100$ cm, and case 7 only $h > -50$ cm.

results again indicate that including water retention data at pressure heads below the tensiometer range (about -500 cm) will improve the estimates of the soil hydraulic parameters.

Since water retention at low pressure heads now can be measured relatively easily and accurately using dew point potentiameters (e.g., WP4), we strongly recommended to include in the optimization also water retention data in the measurement range of the dew point potentiameter ($-10^5 < h < -3 \times 10^3$ cm) to extend the applicable range of the model predictions. On the other hand, estimates of the hydraulic conductivity at the very low pressure heads (e.g., $h < -10^4$) may require further investigations because of the possible effects of film flow (Peters and Durner, 2008), diffusion of water vapor (Saito et al., 2006; Peters and Durner, 2010) and the effect of shrinkage (Dorel et al., 2000).

3.3 Pressure head measurement range

We next demonstrate the effect of using different ranges of the pressure head data measured in the columns during the evaporation experiments in the inverse analysis, while fixing in the objective function the bimodal water retention parameters (θ_r, θ_s, α_1, n_1, w_2, α_2, n_2) as determined from the independently measured retention data. These scenarios are the same as case 1 in that only the conductivity parameters (K_s, ℓ) are optimized, except that we used different ranges of the measured pressure heads in the optimizations: only data for which $h > -200$ cm (case 5), $h > -100$ cm (case 6), and $h > -50$ cm (case 7). The estimated parameter values for these three cases (5 to 7) are given in Table 1.

Fig. 7 shows the estimated $K(h)$ plots for the Kumamoto and Mie Andisols obtained with the different pressure head measurement ranges. The conductivity function for case 1 is the same as shown in Fig. 4. Except for the much lower $K(h)$ curve for case 7 of the Kumamoto Andisol, the plots neglecting the lower pressure data did not affect the $K(h)$ results very much; they produced almost identical $K(h)$ curves as for case 1. For the Mie Andisol, even case 7 did give a good estimate of $K(h)$, likely because $h > -50$ cm covered the entire region of the first slope of the water retention curve (Fig. 1). We conclude that independently measured water retention data covering a wide range of pressure heads provide very useful information to the parameter estimation process, leading to a much more robust optimization of the remaining parameters (K_s, ℓ in this case). Note that the standard errors and coefficients of variation have a tendency to increase as the pressure range becomes narrower (Table 1). This means that one should still use all available tensiometer data in the objective function.

4. Conclusions

Parameters of the bimodal VG model for two aggregated Andisols were inversely determined using the evap-

oration method. Independently measured water retention data from near saturation to very low pressure heads down to -10^5 cm were included in the objective function in addition to soil pressure head data at two depths measured during the evaporation experiments. The saturated hydraulic parameter, K_s, and the pore-connectivity factor, ℓ, along with several sets of water retention parameters were optimized. Since direct θ_s measurements are often quite variable for high-porosity Andisols, the saturated water content was determined from the final water content and the measured cumulative amount of evaporation. When the value of θ_s is fixed from these water mass balance considerations, K_s should be estimated in the evaporation method.

Since the initial estimates of the water retention parameters were determined from the independently measured water retention data, parameter estimation succeeded to converge quickly regardless of the number of optimized parameters. When water retention data from near saturation to very low pressure heads are available and used in the objective function, it is possible to predict $K(h)$ by optimizing only two conductivity parameters (K_s, ℓ). Since the flat region of the bimodal water retention curve is difficult to measure precisely, we recommend optimizing all of the bimodal VG parameters except θ_s and θ_r to yield the best overall fit.

In order to demonstrate the role of water retention data at low pressure heads in the objective function, we compared hydraulic functions optimized with and without water retention data at low pressure heads. Although almost similar matches to observed pressure heads were obtained with or without the low pressure data in the dry range, the second subregion parameter (α_2, n_2) converged to different values if the low pressure data were omitted from the objective function. Predictions based on the hydraulic functions optimized with the low pressure data agreed well with observed pressure heads near the surface after a longer period of evaporation than used for the tensiometer measurements. The results indicate that including water retention data at low pressure heads can extend the applicable range of the model predications, at least down to approximately -10^4 cm.

The benefit of using independently measured water retention data was further studied by including different pressure head measurement ranges in the objective function. Neglecting the lower pressure data did not affect the $K(h)$ estimation process very much, leading to almost similar $K(h)$ functions. This confirms that collecting water retention data over a wide range of pressure heads will give very useful prior information to the parameter estimation process.

References

Bittelli, M. and Flury, M. (2009): Errors in water retention curves determined with pressure plates and their effect on soil hydraulic functions. Soil Sci. Soc. Am. J., 73: 1453–1460, doi: 10.2136/sssaj2008.0082.

Chamindu Deepagoda, T.K.K., Moldrup, P., Jensen, M.P., Jones, S.B., de Jonge, L.W., Schjønning, P., Scow, K., Hopmans, J.W., Rolston, D.E., Kawamoto, K. and Komatsu, T. (2012): Diffusion aspects of designing porous growth media for earth and space. Soil Sci. Soc. Am. J., 76: 1564–1578, doi: 10.2136/sssaj2011.0438.

Cresswell, H.P., Green, T.W. and McKenzie. N.J. (2008): The adequacy of pressure plate apparatus for determining soil water retention. Soil Sci. Soc. Am. J., 72: 41–49, doi: 10.2136/sssaj2006.0182.

Coppola, A. (2000): Unimodal and bimodal descriptions of hydraulic properties for aggregated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 64: 1252–1262, doi: 10.2136/sssaj2000.6441252x.

Dane, J.H. and Hopmans, J.W. (2002): Water retention storage. In Dane, J.H. and Topp, G.C. (ed.) Methods of soil analysis. Part 4. pp. 675–680. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.

Dorel, M., Roger-Estrade, J., Manichon, H. and Delvaux, B. (2000): Porosity and soil water properties of Caribbean volcanic ash soils. Soil Use Manage., 16: 133–140, doi: 10.1111/j.1475-2743.2000.tb00188.x.

Durner, W. (1992): Predicting the unsaturated hydraulic conductivity using multi-porosity water retention curves. In van Genuchten, M.Th., Leij, F.J. and Lund, L.J. (ed.) Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils: Proc. Intl. Workshop, Riverside, pp. 185–202. CA. 11–13 Oct. 1989. U.S. Salinity Lab., Riverside, CA.

Durner, W. (1994): Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. Water Resour. Res., 30: 211–223, doi: 10.1029/93WR02676.

Durner, W. and Or, D. (2005): Soil water potential measurement. In Anderson M.G. and McDonnell, J.J. (ed.) Encyclopedia of Hydrological Sciences, pp.1089–1102. John Wiley & Sons, Ltd., doi: 10.1002/0470848944.hsa077a.

Durner, W. and Iden, S.C. (2011): Extended multistep outflow method for the accurate determination of soil hydraulic properties near water saturation. Water Resour. Res., 47: W08526, doi: 10.1029/2011WR010632.

Fayer, M.H. and Simmons, C.S. (1995): Modified soil water retention functions for all matric suctions. Water Resour. Res., 31: 1233–1238, doi: 10.1029/95WR00173.

Gerke, H.H. and van Genuchten, M.Th. (1993): A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. Water Resour. Res., 29: 305–319, doi: 10.1029/92WR02339.

Hamamoto, S., Perera, M.S.A. Resurreccion, A.C., Kawamoto, K., Hasegawa, S., Komatsu, T. and Moldrup. P. (2009): The solute diffusion coefficient in variably compacted, unsaturated volcanic ash soils. Vadose Zone J., 8: 942–952, doi: 10.2136/vzj2008.0184.

Hopmans, J.W. and Dane, J.H. (1986): Temperature dependence of soil water retention curves. Soil Sci. Soc. Am. J., 50: 562–567, doi: 10.2136/sssaj1986.03615995005000030004x.

Hopmans, J.W., Šimůnek, J., Romano, N. and Durner, W. (2002): Simultaneous determination of water transmission and retention properties. Inverse methods. In Dane, J.H. and Topp G.C. (ed.) Methods of Soil Analysis, Part 4, pp. 963–1008. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison WI.

Iden, S.C. and Durner, W. (2007): Free-form estimation of the unsaturated soil hydraulic properties by inverse modeling using global optimization. Water Resour. Res., 43: W07451, doi: 10.1029/2006WR005845.

Kaveh, F. and van Genuchten, M.Th. (1992): A further look at a new unsaturated hydraulic conductivity equation. Iranian J. Agric. Sciences, 23: 24–32.

Maček, M., Smolar, J. and Petkovšek, A. (2013): Extension of measurement range of dew-point potentiameter and evaporation method. Proc. 18th Intl. Conf. Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 1137–1142, Paris.

Mallants, D., Jacques, D., Tseng, P.H., van Genuchten, M.Th. and Feyen, J. (1997): Comparison of three hydraulic property measurement methods. J. Hydrol., 199: 295–318, doi: 10.1016/S0022-1694(96)03331-8.

Miyamoto, T., Annaka, T. and Chikusi, J. (2003): Soil aggregate structure effects on dielectric permittivity of an Andisol measured by time domain reflectometry. Vadose Zone J., 2: 90–97, doi: 10.2136/vzj2003.9000.

Mohanty, B.P., Bowman, R.S., Hendrickx, J.M.H. and van Genuchten, M.Th. (1997): New piecewise-continuous hydraulic functions for modeling preferential flow in an intermittent flood-irrigated field. Water Resour. Res., 33: 2049–2063, doi: 10.1029/97WR01701.

Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res., 12: 513–522, doi: 10.1029/WR012i003p00513.

Nanzyo, M. (2002): Unique properties of volcanic ash soils. Glob. Environ. Res., 6: 99–112.

Othmer, H., Diekkrüger, B. and Kutilek, M. (1991): Bimodal porosity and unsaturated hydraulic conductivity. Soil Sci., 152: 139–150, doi: 10.1097/00010694-199109000-00001.

Peters, A. and Durner, W. (2008): A simple model for describing hydraulic conductivity in unsaturated porous media accounting for film and capillary flow. Water Resour. Res., 44: W11417, doi: 10.1029/2008WR007136.

Peters, A. and Durner, W. (2010): Reply to comment by N. Shokri and D. Or on ”A simple model for describing hydraulic conductivity in unsaturated porous media accounting for film and capillary flow”. Water Resour. Res., 46: W06802, doi:10.1029/2010WR009181.

Peters, R.R. and Klavetter, E.A. (1988): A continuum model for water movement in an unsaturated fractured rock mass. Water Resour. Res., 24: 416–430, doi: 10.1029/WR024i003p00416.

Priesack, E. and Durner, W. (2006): Closed-form expression for the multi-modal unsaturated conductivity function. Vadose Zone J., 5: 121–124, doi:10.2136/vzj2005.0066.

Saito, H., Šimůnek, J. and Mohanty, B. (2006): Numerical analyses of coupled water, vapor and heat transport in the vadose zone. Vadose Zone J., 5: 784–800, doi:10.2136/vzj2006.0007.

Sakaguchi, A., Nishimura, T. and Kato, M. (2005): The effect of entrapped air on the quasi-saturated soil hydraulic conductivity and comparison with the unsaturated hydraulic conductivity. Vadose Zone J., 4: 139–144, doi:10.2136/vzj2005.0139.

Sakai, M and Toride, N. (2007a): Optimum conditions for predicting unsaturated hydraulic properties using the evaporation method. J. Jpn. Soc. Soil Phys., 106: 33–46.

Sakai, M and Toride, N. (2007b): Soil water hydraulic functions for a sandy soil and an aggregated soil. J. Jpn. Soc. Soil Phys., 107: 63–77.

Schaap, M.G. and Leij, F.J. (2000): Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-van Genuchten model. Soil Sci. Soc. Am. J., 64: 843–851, doi: 10.2136/sssaj2000.643843x.

Schelle, H., Iden, S.C., Peters, A. and Durner, W. (2010): Analysis of the agreement of soil hydraulic properties obtained from multistep-outflow and evaporation methods. Vadose Zone J., 9: 1080–1091, doi: 10.2136/vzj2010.0050.

Schindler, U., Durner, W., von Unold, G., Mueller, L. and Wieland, R. (2010): The evaporation method — Extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air-entry pressure of the ceramic cup. J. Plant Nutr. Soil Sci., 173: 563–572, doi: 10.1002.jpln200900210.

Shoji, S., Nanzyo, M. and Dahlgren, R.A. (1993): Volcanic ash soils: Genesis, properties, and utilization, pp. 1–288. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

Šimůnek, J., Wendroth, O. and van Genuchten, M.Th. (1998): Parameter estimation analysis of the evaporation method for determining soil hydraulic properties. Soil Sci. Soc. Am. J., 62: 894–905, doi:10.2136/sssaj1998.03615995006200040007x.

Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M. and van Genuchten, M.Th. (2008): The Hydrus-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 4.0. HYDRUS Softw. Ser. 3. Dep. of Environ. Sci., Univ. of California, Riverside.

Spohrer, K., Herrmann, L., Ingwersen, J. and Stahr, K. (2006): Applicability of uni- and bimodal retention functions for water flow method in a tropical acrisol. Vadose Zone J., 5: 48–58, doi:10.2136/vzj2005.0047.

van Genuchten, M.Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 892-898, doi: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.

van Genuchten, M.Th., Leij, F.J. and Yates, S.R. (1991): The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0. EPA Report 600/2-91/065, R.S. Kerr Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK, 85 p. (http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?retc).

Wösten, J.H.M. and van Genuchten, M.Th. (1988): Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic properties. Soil Sci. Soc. Am. J., 52: 1762–1770.

Zurmühl, T. and Durner, W. (1998): Determination of parameters for bimodal hydraulic functions by inverse method. Soil Sci. Soc. Am. J., 62: 874–880, doi: 10.2136/sssaj1998.03615995006200040004x.

要　　旨

団粒構造を持つ 2 種類の黒ボク土に対して，蒸発法を用いて bimodal van Genuchten（VG）モデルのパラメータを逆解析により決定した．モデルを水分保持曲線の実測値に適合した初期値を用いると，推定パラメータの数にかかわらず収束は速い．また飽和付近から -10^5 cm 程度の低圧力水頭までの実測データに適合した bimodal VG モデルの水分保持曲線のパラメータ値を固定すると，透水係数の 2 個のパラメータ（K_s, ℓ）のみの最適化により不飽和透水係数 $K(h)$ の推定が可能であった．しかし階段状の水分保持曲線の平坦な中間圧力領域における正確な測定は難しいため，結果全体に対する最適な結果を得るために bimodal VG モデルのパラメータはすべて適合することが望ましい．乾燥領域の低圧力領域までの水分保持曲線のデータを目的関数に含めると，モデルの適用範囲は，-10^4 cm 程度まで広がった．

キーワード：不飽和透水係数，水分保持曲線，団粒土，黒ボク土，蒸発法

バイアル瓶脱気装置セット（アクリル製）

EN-1003

★特　徴

小型容器（バイアル瓶等）を素早く容易に減圧状態にする事ができます。

15ml のバイアル瓶では、同時に約 35 本の減圧が可能です。

組立式ですので部品の交換が容易です。

★セット内容

バイアル瓶脱気装置 1 式（真空マノメータ付）

真空ポンプ 1 式（ホース・オイル・ミストトラップ付）

★製造・販売元

（有）エンドウ理化

〒001-0910

札幌市北区新琴似 10 条 7 丁目 3 番 16 号

Tel：（011）763-1088　　Fax：（011）763-1667

Mail：endo-rika@mb.infosnow.ne.jp

※本仕様は予告なく変更する場合がございます

J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 125, p.17 ~ 27 (2013)

論　文
Original Paper

播種時の過湿・過乾燥リスクを伴う粘土質転換畑における ダイズの適切な播種条件の解析

吉田修一郎 [1]・細川　寿 [2]・足立一日出 [3]

Analysis of suitable condition for soybean planting in rotational clayey paddy fields under risk of excessive dry or wet condition

Shuichiro YOSHIDA[1], Hisashi HOSOKAWA[2] and Kazuhide ADACHI[3]

Abstract: Stabilization of soybean cultivation in rotational paddy fields is important issue for efficient utilization of Japanese arable land. The present study aimed to clarify the suitable condition of soybean planting for stable establishment in clayey paddy fields by taking account the particularity of physical properties of clayey paddy soils. The effects of four experimental factors: intensity of compression, days after tillage, seeding depth, and tilth on the germination and growth of soybean, were investigated by field experiments following the randomized block design. The seeding depth and the timing of seeding after tillage were revealed to be the most influential factor while compression had supplementary role. Mean dimension of aggregates did not affect the germination and growth under the poor tilth condition. The results suggest that seeding should be conducted soon after tillage but the optimal depth depends on the expected weather in the following days. However if drainage efficiency of the field can be improved, seeding deeply supposed to be less risky unless enough rain is surely expected.
Key Words : clayey paddy, soybean, soil aggregates, germination, establishment

1. はじめに

ダイズの出芽・苗立ちの安定化は，転換畑におけるダイズ作での単収向上において重要な要素である．出芽・苗立ちを不安定にする要因としては，播種後の土壌の過湿，過乾燥が挙げられる．土壌の過湿の影響については，発芽に不可欠な酸素の不足，乾燥種子が急激に吸水することによる組織の損傷とそれに続く栄養成分の浸出による種子活力の低下（例えば，浜口ら, 1985; 鄭・細部, 2000）などが明らかになっている．このような播種期の湿害は，出芽・苗立数の不良による栽植密度の低下のみならず，その後の生育不良にもつながる（有原, 1998）ため，様々な角度から研究がなされてきた．特に，本州の日本海側においては，過湿の原因となる排水不良が問題となる重粘土転換畑が多く存在し，湿害回避はダイズ作において重要な課題となっている．一方で，この地域ではダイズ播種時期に当たる 5 月下旬から 6 月上旬には連続晴天となる年が多く，播種後の過乾燥のリスクも同時に存在する．水分不足により，発芽が数日遅れる程度であれば，致命的な問題にはならない．しかし，播種直後に残存していた利用可能な土壌水分が，播種後に急速に減少する場合，種子が 途中まで吸水したのち再び乾燥したり，根が十分に発達する前に乾燥した環境におかれたりすると，発芽能力やその後の生育に致命的な影響を及ぼすことが指摘されている（Helms et al., 1996a）．このような種子周囲の土壌の過乾燥は，深部に播種することで回避できる（Stucky, 1976）が，大きな降雨が一旦あれば，逆に湿害リスクが高まる．

ダイズの出芽・発芽を左右する播種条件としては，上記の播種深度の他に，鎮圧（Hummel et al., 1981; 高橋ら, 2008），耕うん後播種までの日数（細川, 2005），砕土率（孫ら, 2004; Rathore et al., 1983）等が挙げられる．これらは，個別に主要因として影響を及ぼすと考えられるが，特定の組み合わせが相乗効果や相殺効果（交互作用）を持つことも考えられる．しかし，播種条件に関する多くの研究では，特定の要因のみに着目したものが多く，組み合わせによる効果の評価が十分に行われていると言えない．また，同一のほ場において，過乾燥条件の場合と過湿条件の場合の特徴を実証的に比較した研究は見られない．

本研究では，過湿や過乾燥，さらに砕土不良により，ダイズの出芽が問題となりやすい重粘土転換畑ほ場において，ダイズの播種条件の組み合わせが，乾燥傾向にある年と過湿傾向にある年の出芽・苗立ちに及ぼす影響を

[1]Graduate School of Agricultural and life sciences, The University of Tokyo, 1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8657, Japan. Corresponding author : 吉田修一郎，東京大学大学院農学生命科学研究科
[2]National Agricultural Research Center, NARO, 3-1-1, Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8666, JAPAN.
[3]Kubota Corporation, 1-1-1, Hama, Amagasaki, Hyogo, 661-8567, JAPAN.
2012 年 6 月 26 日受稿　2013 年 11 月 8 日受理

ほ場試験により統計的に解析し，そのメカニズムについて考察を行った．

2. 実験方法

中央農業総合研究センター北陸研究センター（新潟県上越市）内の転換畑ほ場を用いて，2006 年と 2007 年の 2 ヶ年にわたりダイズの出芽試験を行った．当該ほ場の土壌は，スメクタイト質の粘土を主に含む沖積土で，ほ場の平均粘土含量，シルト含量はそれぞれ 44 %，38 % と細粒分に富み，陽イオン交換容量は 26 $cmol_c kg^{-1}$ である．ほ場の耕作履歴は，試験前年まで 5 年間は水稲，さらにその前は 3 年以上畑作物が栽培されていた．

砕土目標を細と粗の 2 水準，播種日を砕土直後と 3 日後（2006）もしくは 5 日後（2007）の 2 水準，播種深度を 3 cm と 7 cm の 2 水準，鎮圧強度を 0 kPa，3 kPa，6 kPa，12 kPa の 4 水準，以上 4 要因をほ場内の南北 2 ブロックに分けて全 32 区に割り付けた．この実験計画のもとでは，2 水準の要因は 16 反復，4 水準の要因は 8 反復の試験となる．なお，鎮圧強度については，慣用の機械播種時の実測値である 6 kPa（高橋ら, 2008）を基準として，その大小の値を設定した．試験区の割付は，L_{32} 直交表を用いた乱塊法によった．砕土処理の結果を評価するため，細・粗両区からそれぞれ 4 点を選び，耕うん直後の土壌をふるい分けすることにより土塊径分布を測定した．

各試験区内には，播種後の日数に応じて種子を掘り出してその水分や根の伸張を測定するための部分（Zone A）と，そのまま出芽させて各日の出芽数やその後の成長を記録するための部分（Zone B）の 2 ゾーンをそれぞれ設けた．所定の深さに確実に種子を播種できるように，Fig. 1 に示したような筒を播種床の所定の深さまで挿入し，種子を筒の中に落とし込んで上から軽く覆土した．すなわち，種子の下端が所定の深さとなるようにした．用いた種子は，選別を行った後にキヒゲン（米澤化学社）を塗布したもので，品種はエンレイ，種子水分は 11 % であった．

Zone A においては，9 cm × 75 cm 間隔で 2 粒ずつ播種した．Zone B においては，同じく 9 cm × 75 cm の間隔をあけて 1 粒ずつ播種した．2006 年の播種は 5 月 29 日および 6 月 1 日，2007 年の播種は，5 月 29 日および 6 月 3 日に行った．播種後，鎮圧処理を行う試験区においては，Fig. 2 に示した自作の鎮圧器具に所定の重量の錘を載せ，その自重によって播種した部分を静かに鎮圧した．この装置の接地面積は，機械作業で広く用いられている鎮圧輪が土壌と接触している面積を考慮して定めた．耕うん砕土作業は，トラクター（F475D，ヤンマー（株））にアップカットロータリー（ニプロ CU-1600）を装着し実施した．アップカットロータリーを用いると，比較的乾燥した上層の砕けやすい土が砕土後に表層近傍に集まりやすい．そのため，この試験ほ場のような砕土が困難な粘質な転換畑土壌においても，播種床となる地表に近い層の砕土率に十分な差異を与えることができる．砕土状態の細粗は，トラクターの走行速度とロータリーの回転速度の調整によって発生させた．Zone A においては，播種後所定の経過日数に応じて，一回に 4 粒ずつを掘り返し，種子水分や発芽状況，食害の有無を調べた．Zone B においては，出芽率および出芽後の生育経過を追跡した．

播種後の土壌のマトリックポテンシャルの変化につい

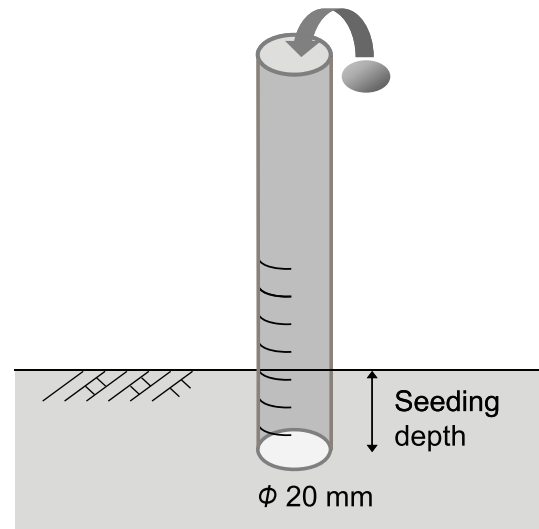



Fig. 1　パイプを用いた播種方法.
Method of seeding using a plastic pipe.

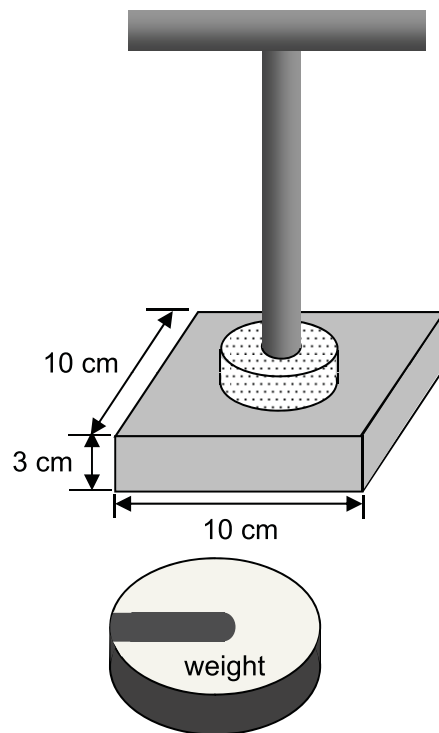



Fig. 2　定応力での鎮圧装置．試験区の設定に応じた鎮圧応力を，おもりの個数で調整して静的に与える.
Equipment for compression of seed-bed at designed stresses. Compression stresses following to the experimental design were imposed to seed-beds by adjusting the number of weights.

Table 1　砕土率および耕うん直後の作土層の平均含水比.
Tilth and mean water content of tilled layer after the tillage.

Year	Layer	Treatment	Percentage of ＜ 20 mm			Percentage of ＜ 10 mm			Water content at the tillage gravimetric %		
2006	0–10 cm	Coarse	37.3	±	6.9	13.2	±	2.2	42.1	±	0.5
			*			*			ns		
		Fine	60.1	±	2.6	21.4	±	6.1	41.7	±	1.3
2007	0–5 cm	Coarse	51.8	±	12.6	24.1	±	3.6			
			*			ns					
		Fine	69.6	±	9.3	32.1	±	6.1			
	5 cm ～	Coarse	40.2	±	10.2	21.6	±	2.4			
			*			*					
		Fine	60.2	±	12.7	30.0	±	4.6			
	Whole Layer	Coarse	42.8	±	4.4	22.2	±	2.6	35.7	±	1.0
			*			*			ns		
		Fine	62.4	±	7.4	30.6	±	4.9	37.0	±	1.4

1）各 4 区平均 ± 標準偏差.
2）* は 5 % の危険率で有意差あり，ns は有意差なしを示す.

ては，テンシオメータを用いて測定した．いずれの年も内径 13 mm の塩化ビニルパイプの先端に感知部の長さ 50 mm のポーラスカップを接着したものを用いた．ただし，2006 年はこれらを地表面から鉛直に挿入し，感知部の深さを 2.5 ～ 7.5 cm，7.5 ～ 12.5 cm とした．パイプ内の圧力は，圧力変換器を用いて連続観測を行った．テンシオメータは，試験ほ場内の細砕土区のうち，鎮圧 12 kPa 区と無鎮圧区の 2 点に設置した．一方，2007 年は塩ビ管を途中で L 字に曲げ，感知部を土層に水平に埋設し，反対側の端は地表に出るようにした．埋設深は，播種深度を考慮して 3 cm と 7 cm とした．地表に出ている端は，シリコン栓で密閉し，そこにマノメータと接続された注射針を定期的に挿して，負圧を計測した．設置個所は，耕うん直後に播種した試験区のうち，鎮圧 12 kPa 区と無鎮圧区の計 8 点とした．気温と降水量については，中央農業総合研究センター北陸研究センターの気象観測露場で測定されたデータを用いた．

3. 実験結果

3.1 播種前後の天候・土壌水分の変化

試験を実施した 2 カ年の播種時期の降雨条件は，Fig. 3 に示す通り対照的であった．2006 年は 1 回目の播種の前 7 日間の降水量が 16 mm と少なく，播種後も 10 日間無降雨日が続いた．ダイズの播種深度に相当する 2.5 ～ 7.5 cm 深の土壌の水ポテンシャルは，耕うんから 11 日目の最初の降雨の直前で −60 kPa に達した．一方，2007 年は，1 回目の播種前 7 日間の降水量は 7 mm であったが，その翌日から翌々日に 25.5 mm の降雨があった．そのため，2 回目の播種は 1 回目の播種（耕うん）の 5 日後とした．3 cm 深の全測点平均の土壌の水ポテンシャルは，2 回目の播種後に −45 kPa まで急速に乾いたが，7 cm 深では −2 kPa からゆっくりと −12 kPa まで乾燥が進んだ程度で，過湿傾向で推移した．

播種時期の設定は，各日の土壌水分の推移に影響しないことを考慮すると，両年各深度での播種後の土壌の水分条件については以下のように要約できる．2006 年は，2 回目（耕うん 3 日後）に浅層（3 cm）に播種された種子が，特に乾燥した条件下に置かれることとなった．2007 年については，1 回目（耕うん直後）に深層（7 cm）に播種された種子は，長期間過湿な条件下に置かれた．一方で，2 回目（耕うん 5 日後）に浅層（3 cm）に播種された種子は，播種後乾燥した条件下に 4 日程度置かれたが，その後降雨により土壌水分は回復した．

3.2 砕土率・耕うん直後含水比

耕うん直後にふるいを用いて測定した砕土率（2 cm 目のふるい通過率）を Table 1 に示した．砕土処理は，目標通りに粗砕土区と細砕土区の間で有意な違いを与えることができた．2007 年の結果が示すように，逆転ロータリーを用いたため，表層 5 cm の方がそれ以下より，10 % 程度良い砕土率となった．ただし，細砕土区においても，2 cm 以下の土塊が重量比で 70 % 以上とする一般的な砕土率の目標（例えば，新潟県農林水産部，2013）は両年とも達成できなかった．なお，耕うん直後の層平均含水比には，砕土の細粗による差はなかった．

3.3 種子の水分吸収

種子の水分吸収状況を年および播種日毎に Fig. 4 に示した．土壌水分の深さによる差異を反映して，7 cm 深の方がいずれの条件でも種子の水分吸収速度は高いが，播種直後に降雨があった 2007 年の 1 回目（耕うん同日）では，播種深度による違いは見られなかった．2006 年の播種日の違いによる影響は，7 cm 深では見られないが，3 cm 深では 2 回目（耕うん 3 日後）の播種で明らかに吸水が遅滞し，3 日後にはむしろ乾燥する傾向すら見られた．このように一旦吸水した後乾燥するような水分吸収パターンは，発芽の遅れのみならず種子の発芽能力を大幅に低下させるため，特に回避されるべきである．

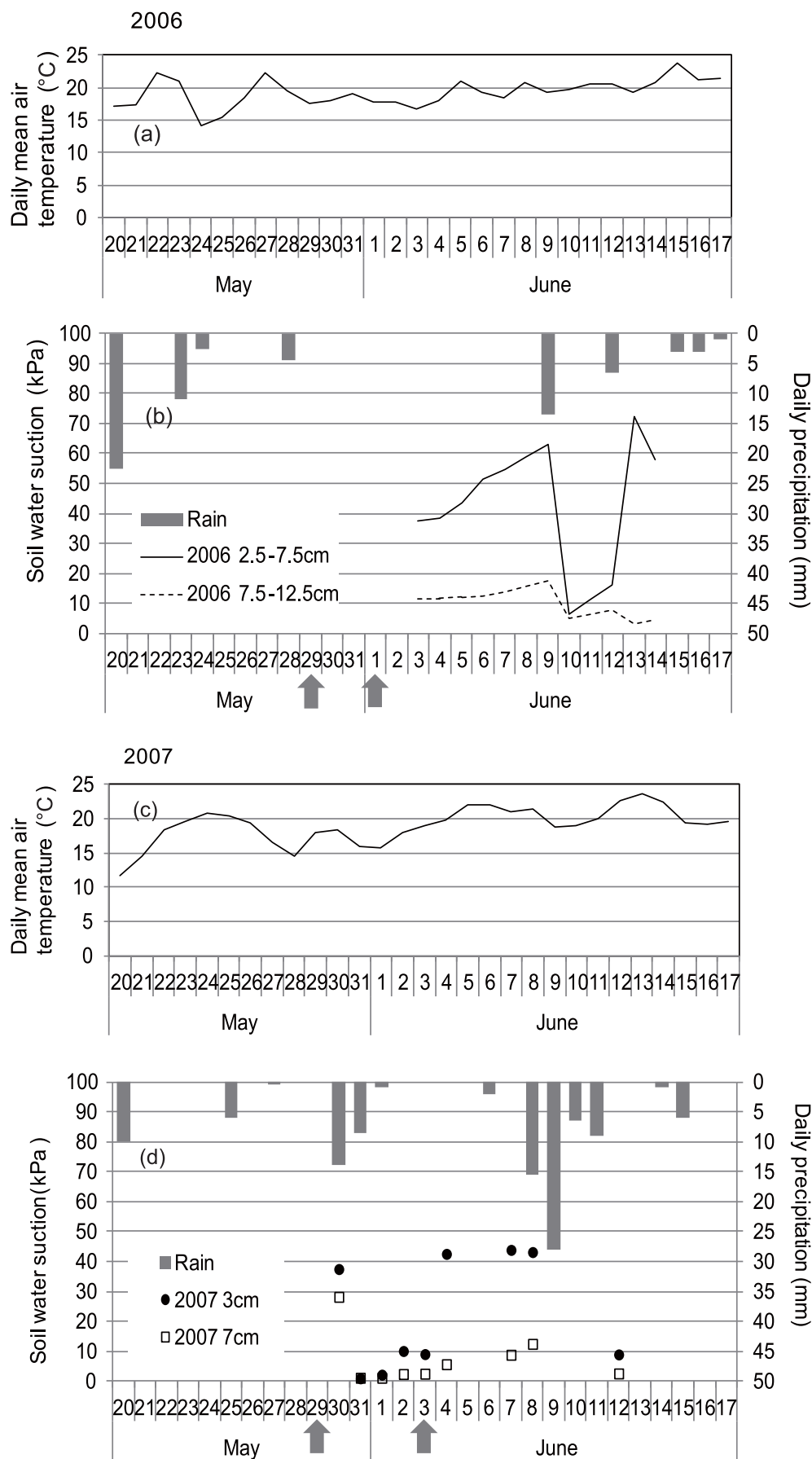



Fig. 3 播種前後の気温，降水量および土壌水ポテンシャルの推移．(a) 2006 年の気温，(b) 2006 年の降水量および土壌水ポテンシャル，(c) 2007 年の気温，(d) 2007 年の降水量および土壌水ポテンシャル．図下端の矢印は播種日を示す．

Change in air temperature, precipitation and soil water potential during the experiment. (a) Air temperature in 2006, (b) Precipitation and soil water potential in 2006, (c) Air temperature in 2007, (d) Precipitation and soil water potential in 2007. The arrows below the horizontal axes represent the planting dates.

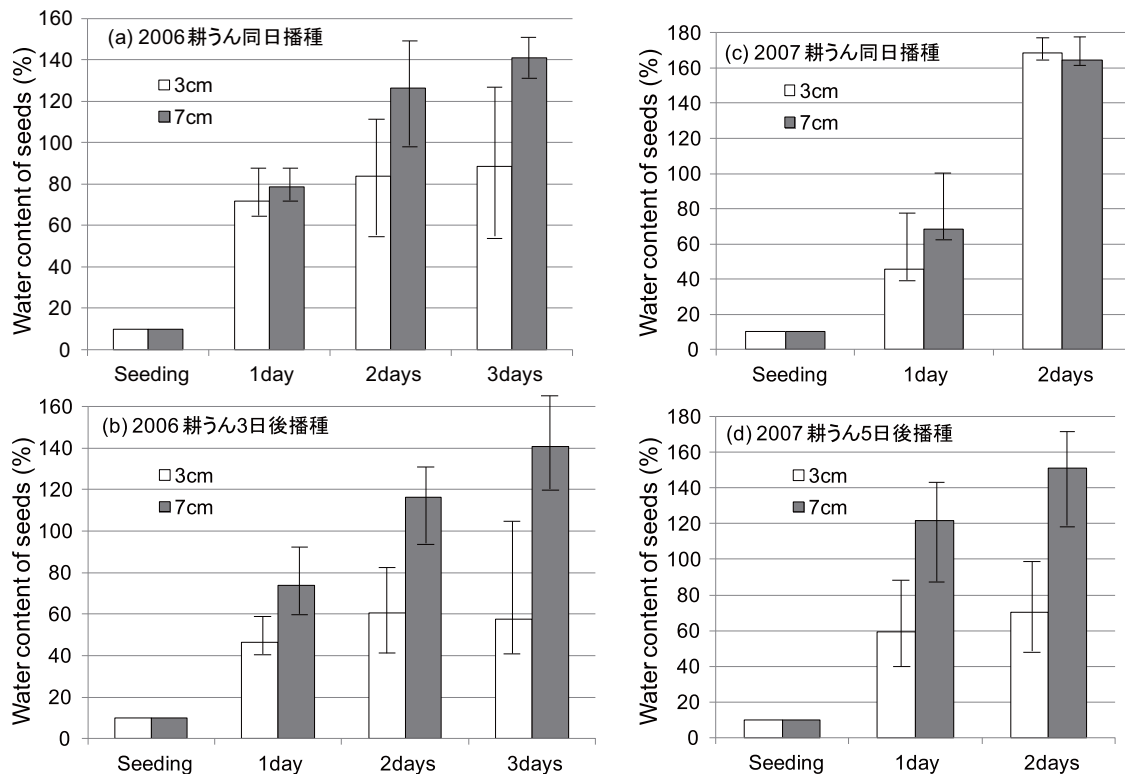



Fig. 4　播種後の種子水分の変化．（a）2006 年耕うん同日播種，（b）2006 年耕うん 3 日後播種，（c）2007 年耕うん同日播種，（d）2007 年耕うん 5 日後播種．播種日の効果のみをこの図では比較しており，各水準 16 区の結果の平均と標準偏差（他の要因による変動を含む）を示したものである．

Change in water content of seeds after planting. (a) Planted soon after the tillage in 2006, (b) Planted three days after the tillage in 2006, (c) Planted soon after the tillage in 2007, (d) Planted five days after the tillage in 2007. Data variation caused by the factors except planting day is represented by error bars: The figure compares the effect due to planting dates alone.

3.4 発芽後の成長

実験処理が種子の水分吸収およびその後の成長に与えた影響（効果）に関して，分散分析の結果とともに Fig. 5 ～ Fig. 7 に示した．それぞれのグラフの縦軸は，横軸の要因のみを変動させたときの「水準平均」を示したものであり，技術効果の比較のための分散分析において「効果」と（奥野，1994）呼ばれる量である．処理の組み合わせにより期待される値は，有意な要因（主要因および交互作用）によりもたらされる偏差，すなわち各縦軸の値と全体の平均値（一点破線，二点破線）との差の線形和に全体の平均を加えた値として推定される．Fig. 5 及び Fig. 6 の図中 × のプロットで示した 2007 年の播種 2 日後の発芽率および両年の播種 5 日後の発芽率については，データがそれぞれ飽和種子水分および発芽率 100 % に偏って分布していたため，分散分析は行っていない．

種子の水分吸収に対しては，前項で述べたように，播種深度と播種日の影響が非常に大きい．また，2007 年では，播種日により，深く播種することの効果に違いがみられた．すなわち，播種深度 × 播種日に有意な交互作用が認められた．2007 年においては，鎮圧が水分吸収に及ぼす影響が認められたが，その効果は小さかった．

水分吸収の差異を反映し，発芽率は，両年とも播種深度 7 cm が 3 cm よりも高くなった．また，2007 年には，耕うん直後の播種により，2 日後の発芽率は有意に高くなったが，5 日後には処理によらず高い発芽率になった．2006 年については発芽率に対する播種日による有意な効果は認められなかった．また発芽率に対する鎮圧の効果は，2006 年の播種 3 日後のみに認められた．

播種 2 週間後の出芽率に対しては，両年とも播種深度と播種日に有意な効果が現れた．ただし，播種深度の効果は，両年で正反対であった．すなわち，過乾燥傾向が強かった 2006 年には，7 cm の方が 3 cm よりも出芽率は高かった．一方過湿傾向にあった 2007 年には，3 cm の方が 7 cm よりも出芽率は高かった．播種日については，両年とも耕うん直後の方が高い出芽率となった．また，2006 年には無鎮圧と鎮圧との間に差が認められたが，2007 年には全く認められなかった．最適な処理を行った場合に期待される出芽率は，2006 年は 0.83（6 kPa，7 cm，0 日），2007 では 0.87（3 cm，0 日）であった．なお，括弧内は最適な処理（水準）の組み合わせを示したものである．これらの期待値は，全体の平均値（図中破線）に最適水準の出芽率と平均値の差（処理効果）を加算することで得られる．有意ではない要因については，加算しない．

2007 年には，タネバエによる食害が認められたため，播種 7 日後におけるタネバエの幼虫による種子の食害率を調査した．なお，2006 年はタネバエによる食害は見られなかった．Fig. 8 に示すとおり，タネバエによる種子

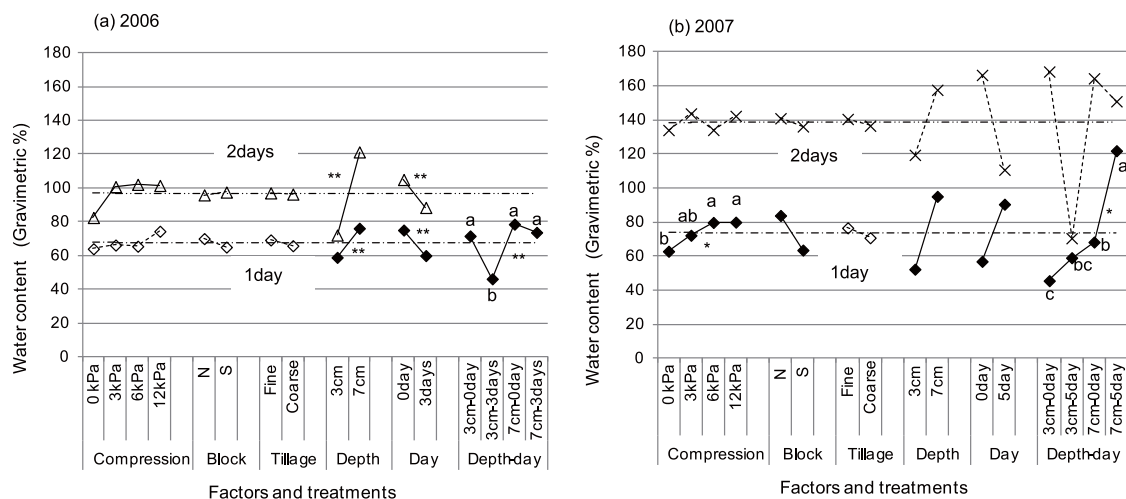



Fig. 5 各要因が種子の水分吸収に及ぼす影響.（a）2006,（b）2007.
1）** および * は，それぞれ 1 %, 5 % の危険率で有意な要因であることを示す.
2）アルファベットは，Tukey の法による多重比較の結果を示す．異なるアルファベットが付された処理間では 5 % の危険率で有意差があることを意味する.
3）塗りつぶされた記号は，有意差が認められた要因，白抜きは有意差が認められなかった要因，× はデータの特性から分散分析を行うのが不適当と判断されたものを表す.
Effects of factors on water absorption by seeds.
1) ** and * denote statistical significance level of $^{**}P > 0.99$ and $^{*}P > 0.95$, respectively.
2) Different letters denote statistically significant ($P > 0.95$) differences between the series of sampling dates from the summer to the following spring according to Tukey's multiple comparison.
3) The filled and open symbols represents statistically significant and non-significant factors, respectively. Crosses denote data sets inadequate for statistical analysis due to the nature of them.

の食害は，2007 年の 2 回目（耕うん 5 日後）に播種された種子のうち細かく砕土された試験区に集中して発生した．食害は，28 日後の出芽率（2 葉到達率）に明らかに影響を与えていた.

4. 考察

4.1 鎮圧の効果

播種後の土壌鎮圧は，土壌と種子の接触を向上させる作用と，下層からの液状水の移動を促進する作用の二つの効果が期待されることが古くから知られている（Johnson and Buchele, 1961; Johnson and Henry, 1964; Hummel et al., 1981）．Collis-George et al.（1966）や Hadas et al.（1974a, 1974b）は，土壌のマトリックポテンシャルが種子の吸水に影響を及ぼすのは，種子と土壌の水ポテンシャル差によるものではなく，種子と土壌の間の液相の接触面積に影響するためであると結論づけ，土壌と種子の密着を向上させる土壌鎮圧の効果を指摘している．また，高橋ら（2008）は粘土質転換畑土壌において，土壌鎮圧により下層から上層への水移動が促進され，土壌水分は表層から下層に向けて緩やかに増加する分布となることを認めた．逆に無鎮圧の場合には 4 cm 深以下とそれ以浅とで大きな水分の差異が生じ，表層に乾燥層が発達することを確認している.

砕土が不十分となりやすい粘土質土壌の作土表層では，土塊間に数ミリ以上の大きさの粗大な間隙が多く存在する一方で，土塊同士の接触が悪く，液状水の毛管移動に寄与する間隙の連続性が悪い．また，土塊間の粗大な間隙では，風による空気の流入や乱れにより，水蒸気のマスフローが起こる．その結果，地表近傍の土層のみが極度に乾燥する．鎮圧は，上記の土塊間間隙を圧縮し，土塊同士の密着を高める働きをするため，下層からの水分供給の促進と地表近傍での粗間隙を通じた水蒸気のマスフローの抑制に寄与すると考えられる.

本研究では，乾燥傾向にあった 2006 年において，鎮圧が種子水分や発芽・出芽率に影響を及ぼした（Fig. 5 ～ Fig. 7）．特に Fig. 6 に示された 3 日後の発芽率については，無鎮圧と 3 kPa での鎮圧の間に大きな有意な差が生じた．さらに，発芽率の交互作用を参照すると，3 cm 深では鎮圧の効果が現れていないのに対し，7 cm 深では無鎮圧とその他の鎮圧処理に著しい違いが現れた．このことから，2006 年の乾燥した条件下では，鎮圧は 3 cm（鎮圧前地表面基準）よりさらに深い層でより大きい効果を発揮したことになる．2006 年の播種後の 2.5 ～ 7.5 cm 層の平均水分ポテンシャルは −70 kPa までしか低下しておらず（Fig. 3），粘土質土壌で出芽率を低下させないことが確認されている範囲内（Heatherly et al., 1979）にあった．しかし，地表近傍の土塊表面は，著しく乾燥が進んでいたと考えられ，深さ 3 cm 付近では，土塊が種子に密着をしていても十分に水を供給できなかったものと考えられる．高橋ら（2008）は室内実験で，土壌の水分ポテンシャルを一定にコントロールしたときの，土塊径および鎮圧強度の違いによる種子の水分吸収速度の差異を調べている．水ポテンシャルが −10 kPa の高水分では，いずれの土塊径でも鎮圧により種子の水分吸収速度が高まる傾向を示したが，−0.1 MPa や −3.2 MPa で

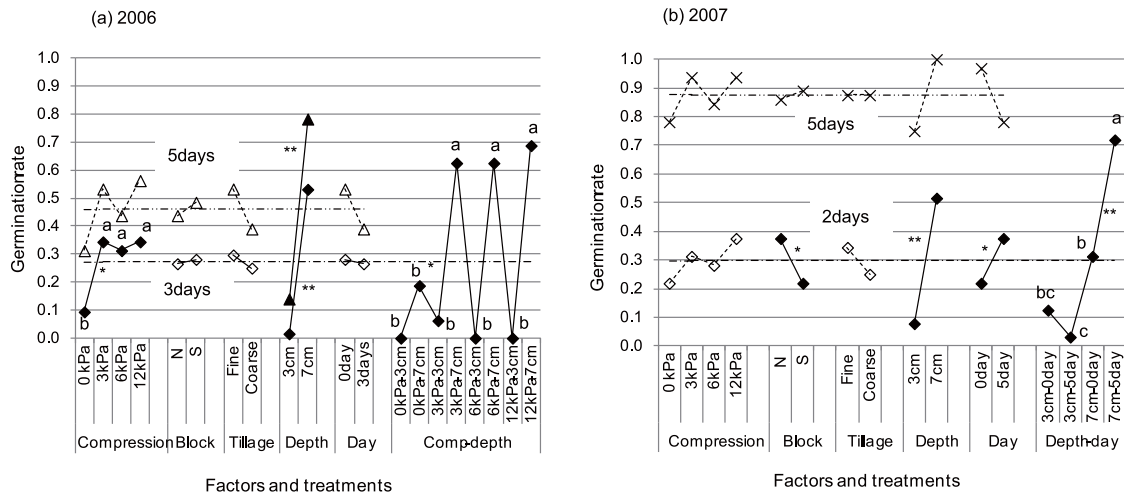



Fig. 6　各要因が種子の発芽率に及ぼす影響．（a）2006,（b）2007.
1）図中の日数は播種後の日数を示す．
2）** および * は，それぞれ 1 %, 5 % の危険率で有意な要因であることを示す．
3）アルファベットは，Tukey の法による多重比較の結果を示す．異なるアルファベットが付された処理間では 5 % の危険率で有意差があることを意味する．
4）塗りつぶされた記号は，有意差が認められた要因，白抜きは有意差が認められなかった要因，× はデータの特性から分散分析を行うのが不適当と判断されたものを表す．
Effects of factors on germination rate of seeds.
1) Days in the figure show the days after the planting
2) ** and * denote statistical significance level of **P > 0.99 and *P > 0.95, respectively.
3) Different letters denote statistically significant (P > 0.95) differences between the series of sampling dates from the summer to the following spring according to Tukey's multiple comparison.
4) The filled and open symbols represents statistically significant and non-significant factors, respectively. Crosses denote data sets inadequate for statistical analysis due to the nature of them.

は，鎮圧による明確な効果は認められなかった．この結果から，鎮圧による種子の水分吸収速度の向上は，主に鎮圧により播種床の水分を高く維持できることによるものであると結論づけている．本実験の結果から，このような水分分布に対する鎮圧の効果について言及することはできないが，高水分で鎮圧の効果が発現する点については，本研究で得られた結果と整合する．

鎮圧強度の影響については 3，6，12 kPa の設定で，乾湿どちらの年においても有意な違いは見られなかった（Fig. 5 ～ Fig. 7）．すなわち，鎮圧の有効性は明らかであるが，その強度や方法については，鎮圧輪により与えられる一般的な荷重範囲内（6 kPa 前後）であれば注意を要する問題ではないと考えられる．

鎮圧をしない場合には，耕うんされた土壌は自重のみにより圧縮される．耕うんされた土壌の湿潤密度は，砕土率の試験結果の際に定容積を採取した土塊の重量から 1.3 ～ 1.8 $\mathrm{Mgm^{-3}}$ であったことがわかっている．この場合，深さ z cm 深での自重は，0.13z ～ 0.18z kPa と見積もられる．例えば 3 cm 深での鎮圧を行わない場合の荷重は，0.4 ～ 0.6 kPa となり，最小の荷重値 3 kPa の 1/5 ～ 1/8 である．地盤の圧縮量は，おおよそ圧縮荷重の対数値に比例するので，無鎮圧から 3 kPa まで荷重したときの圧縮効果は，3 kPa から 12 kPa まで 4 倍に荷重を増大させたときの効果より大きいはずである．このことから，鎮圧強度を大幅に高めれば，結果に違いが生じる可能性はある．しかし，出芽を阻害しない程度の圧縮を想定すると，3 ～ 12 kPa 程度の鎮圧が現実的であり，鎮圧強度が大きな影響を及ぼす状況は考えにくい．

4.2 耕うんから播種までの時間

播種期が乾燥傾向であった 2006 年と，逆に湿潤傾向であった 2007 年の結果（Fig. 5 ～ Fig. 7）から，耕うん同日播種と，数日後の播種との差異を比較すると，乾燥・湿潤どちらの条件においても，耕うんと同時に播種することは，出芽にプラスに働くことが確認された．2006 年には，水分吸収から出芽に至る全ステージにおいて，耕うん同日播種が良い成績であった．一方，2007 年には，播種後の降雨のタイミングが絡み，耕うん 5 日後播種区の方が良好となる時期も一時は見られた．しかし，最終的な出芽率は同日播種が勝った．

2007 年の 5 日後播種で出芽率が悪化した原因としては，タネバエの発生が，5 日後播種区にのみ見られたことが挙げられる（Fig. 8）．タネバエの成虫は耕起直後の湿った畑に集まり，土塊の間などに点々と産卵する．卵が孵化するまでに要する日数は 2 ～ 8 日とされる（農文協，1987）．耕うん直後に産卵されると，ダイズの生育速度が幼虫の成長速度より勝り，食害を受けずに出芽できる．しかし，2007 年の 5 日後播種区のように，湿潤な条件下にもかかわらず耕起後時間をあけて播種すると，幼虫の成長が先行し食害の発生を助長したものと考えられる．なお，砕土性の悪いほ場でタネバエの被害は発生しやすい（農文協，1987）とされるが，本試験においてタネバエの発生は細砕土区に集中していた．上記の砕土性

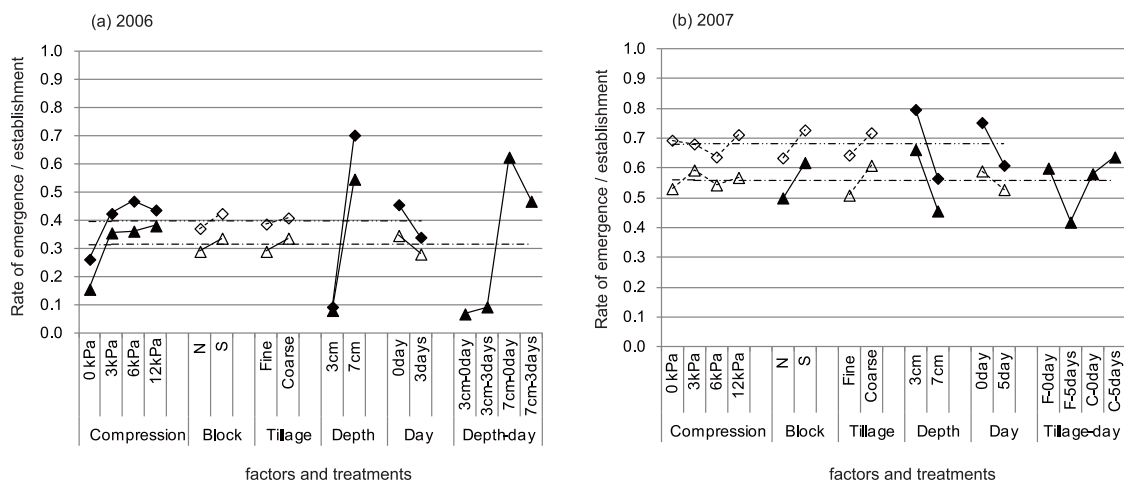



Fig. 7 各要因が播種 14 日後の出芽率および 28 日後の苗立ち率に及ぼす影響．(a) 2006,(b) 2007.
1) ** および * は，それぞれ 1 %, 5% の危険率で有意な要因であることを示す．
2) アルファベットは，Tukey の法による多重比較の結果を示す．異なるアルファベットが付された処理間では 5 % の危険率で有意差があることを意味する．
Effects of factors on emergence and establishment rate.
1) ** and * denote statistical significance level of **P > 0.99 and *P > 0.95, respectively.
2) Different letters denote statistically significant (P > 0.95) differences between the series of sampling dates from the summer to the following spring according to Tukey's multiple comparison.

との関係についての指摘は，劣悪な砕土によりダイズの出芽が遅れることによる食害リスクを問題にしているものとも考えられる．土塊径と産卵や孵化，そして幼虫の成長速度との関係，さらには，砕土率による地表面のわずかな乾燥度合いの影響についての複雑な因果関係については，本試験データから言及することはできない．なお，タネバエの被害が予測される場合にはキヒゲンより強い効果をもつ薬剤による防除が可能であることを付記する．

4.3 播種深度

ダイズの最適な播種深度については，推奨される値に幅があるが，多くは 3～4 cm とされている．ただし，いずれの地域でも，気象条件や土性に応じて，より深めや浅めにすることを推奨している．本研究では，鎮圧前の平均地表面を基準にし，種子の底面までの高さが 3 cm もしくは 7 cm となるように播種を行っているが，鎮圧後にはこれより浅い深度に種子が存在していたことになる．この意味で，本試験で採用した 3 cm および 7 cm という播種深度は，一般に適当な播種深度とされる 3～4 cm に対し，気象条件や土性による調整分の数センチを加除した深度と理解できる．

Fig. 5～7 に示されている通り，乾燥条件と湿潤条件で，明らかに出芽率に対する播種深度の効果は逆転しており，播種後の天候を考えて播種深度を決めることの重要性を示している．

浅い側の限界は，種子が必要な水分を吸収し胚軸を土中に伸ばすまでの間に種子と接する土壌が乾燥しすぎないという条件を満たす深さである．深さ 4 cm に播種されたダイズの種子の出芽率を，土壌の水ポテンシャルを −10～−70 kPa の範囲で 7 段階に制御して調べた実験 (Heatherly et al., 1979) によれば，粘質土では 2 週間で 80 % 以上の出芽率となる水ポテンシャルの範囲は，全処理域であったのに対し，砂質土では −40～−60 kPa に限られた．すなわち，粘質土では，−70 kPa 以上の水ポテンシャルであれば，発芽や出芽に問題は起こらないと考えられるが，水ポテンシャルの低下により飽和度が低下する砂質土では，上記のような水ポテンシャル領域でも，種子への水の移動が抑制されうることを示している．

乾燥年である 2006 年においても 2.5 cm～7.5 cm 層平均の水ポテンシャルは，テンシオメータによる計測が可能な −70 kPa 以内であった (Fig. 3b)．土壌が粘質土であることを考慮すれば，播種深度 7 cm では，その年の天候条件にかかわらず水分不足の問題は生じないと考えられる．一方，播種深度 3 cm では，天候条件によって土壌が過乾燥状態となることを播種後の種子水分変化 (Fig. 4) が示唆している．適当な間隔の降雨がみられた 2007 年では，3 cm での水ポテンシャルが −45 kPa を超えた日はなく (Fig. 3d)，出芽率は 7 cm よりも 3 cm の方が高くなった．一方，乾燥傾向が強かった 2006 年では，3 cm 深での水ポテンシャルの実測値が無いため，出芽に対して影響を及ぼす土壌の水ポテンシャルの下限値を示すことはできない．しかし，Fig. 4 (a) (b) が示すように，3 cm 層での種子水分増加が，播種 1 日後以降で停滞しているのは，乾燥層が播種後数日で 3 cm 以深に達したためであると考えられる．

播種深度が深いときの問題の一つは通気性である．通気性は，土壌構造の安定性や降雨による停滞水の排除に要する時間などが影響する．粘土質転換畑での播種床の排水・通気条件の改善方法としては，畦立て栽培が挙げられる．細川 (2005) は，アップカットロータリーによる耕うん・畦立てと播種を同時に行う機械作業システムを

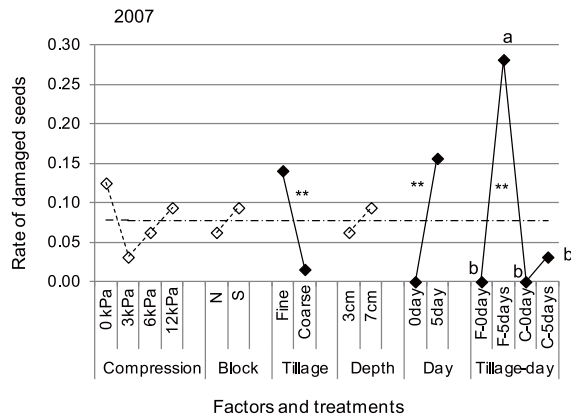



Fig. 8　各要因がタネバエによる食害に及ぼす影響.
1）** および * は，それぞれ 1 %, 5 % の危険率で有意な要因であることを示す.
2）アルファベットは，Tukey の法による多重比較の結果を示す．異なるアルファベットが付された処理間では 5 % の危険率で有意差があることを意味する.
Effects of factors on damage of seeds by seed-corn flies.
1) ** and * denote statistical significance level of **P > 0.99 and *P > 0.95, respectively.
2) Different letters denote statistically significant (P > 0.95) differences between the series of sampling dates from the summer to the following spring according to Tukey's multiple comparison.

開発し，排水性・通気性の改善効果を確認している．また，硬盤破砕や暗渠排水システムの強化が出芽時の排水性の改善に与える効果についても複数の報告がある（例えば，原口, 1994; 足立ら, 2002）.

深播きのもう一つの問題は，出芽までに日数を要するために，途中で病害に感染したり，出芽後の生育が悪くなったりするリスクを抱えることである.

本試験は 3 cm と 7 cm の 2 水準のみ行っているため，この間の播種深度で結果がどのような傾向になりうるかは言及できない．しかし，砕土性や排水性が不良な本試験ほ場においては，乾燥・過湿，どちらのリスクもある程度回避できるいわば「無難な」深度は，鎮圧前の地表面を基準として，3 cm と 7 cm の間に存在すると推察される.

4.4 砕土率

砕土率については，ダイズの栽培において重要視されている項目である．2 cm 以下の土塊の重量割合が 70 % 以上，あるいは平均土塊直径 1.5 cm 以下が，一般に広く採用されている目標である．本実験ではアップカットローターを用いたため，砕土率は，表層の方が高くなった（Table 1 の 2007 年のデータ）．相対的に砕土が良好な 0 ～ 5 cm 層においては辛うじて約 70 %（2007 年）となったが，全層平均の砕土率のレンジは，37 % ～ 62%（両年）であり，細砕土区でも十分な砕土とは言えない．土塊の大きさと出芽率の関係については，孫ら（2004）がポット試験により示した結果が明確な特徴を提示している．この実験では，覆土は 20 mm で，潅水は播種後一回であるが，蒸発を抑制するために播種後はシートで地表面は被覆された．播種 7 日後のダイズの出芽率は，土塊径 10 mm 以下では約 80 % となった．しかし，10 mm 以上では，土塊径が大きくなるにつれて出芽率は低下し，10 ～ 20 mm の土塊では約 60 %，20 ～ 40 mm の土塊では 20 % 以下であった．すなわち，20 mm 以上の土塊の水分は，ダイズの出芽にあまり寄与しないことが示されている．これは 20 mm 以下の土塊の割合が砕土性の指標として広く利用されていることの合理性を示している．さらに細かい粒径レンジでラッカセイの発芽を比較した実験（Khan and Datta, 1983）でも，土塊径と発芽に要する時間との間には明確な関係が示されている．この実験では，土塊径のレンジ 0.25 ～ 0.50 mm，1 ～ 2 mm，2 ～ 4 mm に対して，発芽に要した時間は 69，81，120h であった．以上から，センチメートルオーダーの土塊径の差異は，出芽の可否に，数ミリのオーダーの土塊径の差異は，発芽に至る速度に影響すると考えられる.

機械播種では，砕土率が悪いと播種深度が不安定となるため，砕土率は播種深度にも関係すると考えられる．耕起砕土後にツースハローとカルチパッカで均平を行って播種すれば，砕土率が播種精度に影響を及ぼさないとする報告（西入ら，1976）もみられるが，ロータリーによる砕土だけでは，砕土率が悪い粘質土において安定した播種深度を確保するのは困難である．この影響は数センチのオーダーの土塊が多いときに問題となると考えられる.

砕土性は，土壌水分の移動にも影響を及ぼす．Ojeniyi and Dexter（1984）は，土塊径を 4 ～ 8 mm，8 ～ 16 mm に調整した土層において，土塊径と土壌水分との間に負の相関があったことを示している．すなわち，土塊径が大きいと，下層からの毛管水の上昇は起こりにくくなるとともに，土塊間間隙を通じた水蒸気のマスフローが促進され，地表面近傍の土壌水分の減少が著しくなる．種子が乾燥層より下にあれば，必ずしもこの特徴は悪い影響を及ぼさないが，浅い層に播種されると水分吸収は大幅に遅延する.

以上のように，既往の研究では，砕土性と発芽・出芽率の間には明確な関係が提示されてきた．しかし，本実験では，明確な違いは確認されなかった（Fig. 5 ～ Fig. 7）．その原因として，一つは手播きを行ったことにより播種深度が安定したこと，二つ目は砕土率のレンジが推奨される水準より悪く，発芽の促進に寄与する細かい土塊画分の差の絶対量が十分ではなかったためと考えられる．さらなる砕土率の向上が可能であれば，全体的に高位の発芽条件となることが推察されるが，一方で，重粘土転換畑において，砕土性を向上させることは容易ではなく，転換直後の畑や粘土含量が著しく高いほ場においては，播種深度や播種のタイミングを慎重に検討することで砕土性の悪さをカバーすることも必要と言える.

4.5 播種深度と排水性

播種床層の土壌水分分布が，予測される天候条件のもとで正確に推定できるようになったとしても，天候の予測に不確実性があれば，依然として大きなリスクが付きまとう．Fig. 4 ～ Fig. 7 が示す通り，播種深度が，発芽，出芽に及ぼす影響は決定的であり，降雨条件に応じた播

種深度の設定が，非常に重要であることは明らかである．しかし，播種後の降雨を正確に予測することは年によっては難しく，乾燥，過湿による大きなリスクを回避できる条件設定が必要である．本試験結果が示すように，過乾燥リスクは地表 3 cm では非常に高いが，7 cm では連続干天下でも問題とならない．一方，湿害リスクは深い位置で高まるが，その影響の程度は排水性の良否に左右されると考えられる．よって，湿害リスクを意識しすぎて日常的に浅く播種するより，排水性の確保に努めつつ，深い層に播種することが，リスクの少ない播種方法と考えられる．

5. まとめ

砕土性が不良な重粘土転換畑におけるダイズの出芽・苗立ちを安定化させる播種条件を明らかにするために，播種時期に乾燥傾向の強かった 2006 年と，標準的な降雨が見られた 2007 年にほ場試験を行った．その結果，以下の結果を得た．

1）ダイズの出芽・苗立ちに対しては，播種深度および耕うんから播種までの期間が最も影響の強い要因であった．播種後の降雨の有無によらず，耕うん後は速やかに播種することで出芽・苗立ちは安定化した．

2） 最適な播種深度は，播種後無降雨が続く場合には深い方が有利であるが，すぐに降雨がある場合には浅い方が出芽後の生育は良好であった．降雨の見通しによる播種深度の調整は特に重要な要素である．

3）鎮圧は，乾燥条件下において，播種深度にかかわらず発芽を促進する効果（直接効果）を示したが，特に土壌の水ポテンシャルが −70 kPa を下回らなかった 7 cm 層では，相乗効果（交互作用）をもたらした．しかし，水ポテンシャルがこれより低い 3 cm 層では，相乗効果は発揮されなかった．また，鎮圧強度の違い（3, 6, 12 kPa）は，発芽や生育に影響を及ぼさなかった．

4）2 cm 以下の土塊の割合が 40 ～ 60 % 程度の不良な砕土条件下では，手播きにより播種深度を揃えると，砕土率の良否はダイズの発芽，苗立ちに有意な影響を及ぼさなかった．

謝辞

実験は，中央農業総合研究センター北陸研究センター業務科各位の全面的な支援により行われました．ここに感謝の意を記します．

引用文献

足立一日出, 細川 寿, 吉田修一郎, 松崎守夫 (2002): 重粘土転換畑における本暗渠に浅層暗渠を組み合わせた暗渠排水システムの排水特性. 農業農村工学会論文集, 220: 35–41.

有原丈二 (1998): 出芽で決まる大豆の収量. 農業技術体系作物編 6, 追録, 20 技 178 の 10.

Braunack, M.V. (1995): Effect of aggregate size and soil water content on emergence of soybean (Glycine max, L. Merr.) and maize (Zea mays, L.). Soil and Tillage Research, 33: 149–161.

Collis-George, N. and Hector, J.B. (1966): Germination of seeds as influenced by matric potential and by area of contact between seed and soil water. Australian Journal of Soil Research, 4:145–164.

Khan, A.R. and Datta, B. (1983): Effect of aggregate size on water uptake by peanut seeds. Soil and Tillage Research, 3: 171–184.

Hadas, A. and Russo, D. (1974a): Water uptake by seeds as affected by water stress, capillary conductivity, and seed-soil water contact. I. Experimental study. Agronomy Journal, 66: 643–647.

Hadas, A. and Russo, D. (1974b): Water uptake by seeds as affected by water stress, capillary conductivity, and seed-soil water contact. II. Analysis of experimental data. Agronomy Journal, 66: 647–653.

浜口秀生, 石本政男, 吉田 堯 (1985): 土壌水分と出芽. 農業技術体系作物編, 6, 技 92.

原口暢朗 (1994): 輪換畑における麦あと大豆出芽時の湿害回避に及ぼす硬盤破砕効果の評価法. 農業土木学会論文集, 172: 29–38.

Heatherly, L.G. and Russell, W.J. (1979): Effect of soil water potential of two soils on soybean emergence. Agronomy Journal, 71: 980–982.

Helms, T.C., Deckard, E.L., Goos, R.J. and Enz, J.W. (1996a): Soil moisture, temperature, and drying influence on soybean emergence. Agronomy Journal, 88: 662–667.

細川 寿 (2005): 湿害回避のための大豆耕うん同時畦立て作業技術. 農業技術, 60 (6): 254–257.

Hummel, J.W., Gray, L.E. and Nave, W.R. (1981): Soybean emergence from field seedbed environments. Transactions of the ASAE, 24: 872–879.

Johnson, W.H. and Buchele, W.F. (1961): Influence of soil granule size and compaction on rate of soil drying and emergence of corn. Transactions of the ASAE, 4 (2): 170-174.

Johnson, W.H. and Henry, J.E. (1964): Influence of simulated row compaction on seedling emergence and soil drying tates. Transactions of the ASAE, 7 (3): 252–255.

新潟県農林水産部 (2013): 平成 25 年度水稲, 大麦, 大豆, そばの技術対策情報. 5 月の技術対策. http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML_Simple/171/972/gitai5,0.pdf

農文協 (1987): 作物病害虫百科 診断と防除 2 ムギ, マメ類, 飼料作物. 農文協編, pp. 259–264, 農山漁村文化協会, 東京.

西入恵二, 川村五郎 (1976): 水田転換畑におけるダイズの機械化栽培について. 第 1 報 作土の土塊分布とダイズの生育. 東北農業試験場研究速報, 20: 7–13.

Ojeniyi, S.O. and Dexter, A.R. (1984): Effect of soil structure on soil water status. Soil and Tillage Research, 4: 371–379.

Rathore, T.R., Ghildyal, B.P. and Sachan, R.S. (1983): Effect of surface crusting on emergence of soybean (Glycine max L. Merr) seedlings. 1: Influence of aggregate size in the seedbed. Soil and Tillage Research, 3: 111–121.

孫 宇梅, 伊藤道秋, 荒木 肇, 山下米治 (2004): 作物の出芽, 生育に及ぼす土塊の大きさの影響. 農作業研究, 39(3): 141–156.

Stucky, D.J. (1976): Effects of planting depth, temperature, and cultivars on emergence and yield of double cropped soybeans. Agronomy Journal, 68 (2): 291–294.
高橋智紀, 細川　寿, 松崎守夫 (2008): 重粘質転換畑における土壌鎮圧によるダイズ種子の吸水抑制効果. 日本土壌肥料学雑誌, 79: 1–7.
鄭　紹輝, 綿部隆太 (2000): 浸水によるダイズ種子からの糖溶出と出芽の関係. 日本作物学会紀事, 69 (4): 250–524.

要　　旨

粘質土壌の低い砕土性を考慮しつつ，ダイズの安定的な出芽・苗立ちのための適切な播種条件を明らかにすることを目的として，ほ場における要因試験を行った．4つの要因，すなわち播種深度，耕うん後の播種日，播種後の鎮圧の有無・強度，砕土率が，播種後の種子水分，発芽率，出芽率，苗立ち率に及ぼす影響を解析した．重粘土転換畑におけるダイズの出芽・苗立ちに対しては，1）播種深度および耕うんから播種までの期間が，影響の強い要因であり，耕うん後の速やかな播種が重要であること，2）播種深度は，無降雨が続く場合には深い方が有利であるが，すぐに降雨がある場合には浅い方が出芽後の生育は良好であること，3）鎮圧は，十分な土壌水分のもとでは発芽の促進に相補的に働き，また，強度の違いはほとんど影響を及ぼさないこと，4）不十分な砕土条件下においては，播種深度を揃えた場合，砕土率に差があっても（全層平均の砕土率 37 %～62 %），ダイズの出芽・苗立ちに有意な違いが生じないこと，が明らかになった．

キーワード：粘土質水田，ダイズ，播種，土塊，発芽，苗立ち

J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 125, p.29 ~ 33 (2013)

論　文
Original Paper

フォトダイオードを用いた土壌中の放射能鉛直分布測定器の開発

鈴木心也[1]・岩瀬　広[2]・登尾浩助[3]・溝口　勝[1]・小林大樹[1]・伊藤　哲[4]

Development of a device for measuring the vertical distribution of radioactivity in soil using photodiode

Shinya SUZUKI[1], Hiroshi IWASE[2], Kosuke NOBORIO[3], Masaru MIZOGUCHI[1], Daiki KOBAYASHI[1] and Tetsu ITO[4]

Abstract: Measurements of radiocaesium concentration profiles in a soil are very time-consuming and labor-intensive work. We developed a device for in-situ measurements of the vertical distribution of radioactivity in a soil using a photo diode sensor. Four photodiode sensors were separated by lead-shielded plates to increase directivity at each depth. Because the directivity was relatively broad, we defined a leakage coefficient to compensate the broad directivity by introducing a matrix expression. With a field test of the device in an undisturbed rice field in Iitate Village, Fukushima, we confirmed that the vertical distribution of soil radioactivity was properly measured with the device developed.
Key Words : radiocaesium, vertical radioactivity distribution, photodiode, matrix of leakage coefficient, decontamination

1. はじめに

農地土壌における除染で，除染効果を確かめるために除染前後での放射性セシウム濃度の鉛直分布を測定することが重要である．不耕起水田土壌中の放射性セシウムの大部分は，地表から 3 ~ 5 cm の深さに分布している（塩沢ら, 2011）．しかし，原発事故から 2 年半が経過した現地の水田では，夏草が繁茂し，イノシシが地表面を掘り返していることも多い（溝口, 2012a）．また，有機物の豊富な土壌では，^{137}Cs が約 40 年かけて植物に取り込まれること（Kruyts and Delvaux, 2002; Chiu et al., 2008）や，降雨の範囲や強度により ^{137}Cs が土壌にばらついて吸着されることも示唆されている（Tamura, 1964）．したがって，多くの除染を必要とする農地は，同一の圃場内においても，土壌中の有機物量や栽培作物，透水性の違い等の要因でセシウムの鉛直濃度分布にばらつきが生じることが予想される．また，セシウムは，風化した雲母類に形成され，水和陽イオンの侵入できないフレイド・エッジに固定される（中尾, 2012）ため，土壌中の粘土鉱物の種類や含有量等によっても鉛直濃度分布に違いが生じることが考えられる．このように，農地土壌中における放射性セシウム濃度の鉛直分布は複雑であり，除染を実施する際には，圃場内の複数点で測定する必要がある．

現在，土壌中の放射性セシウム濃度の一般的な深度別測定では，土壌採取を行い，研究室等に持ち帰り，深さ毎に分けた後に Ge 半導体検出器等により放射能を測定する（塩沢ら, 2011 など）．Ge 半導体検出器は高精度で測定できる利点があるが，大型かつ高価であるため現場測定に直接利用することは難しい．また，分析までの作業に多大な労力と時間がかかる上，分析後の汚染土壌の処理についても適切な処理方法を考える必要がある．このため，現場で簡単に複数点において，土壌中の放射性セシウム濃度の鉛直分布を測定できる方法の開発が必要である．

そこで筆者らは，フォトダイオードを用いて，安価で，小型で，可搬性の高い土壌放射能鉛直分布測定器を開発した．フォトダイオードは，もともとは光検出器であるが，放射線が通過する際の電離作用を利用すると，放射線を検知するセンサになり得る．最近では，このフォトダイオードを利用し，iPhone や Android 端末に接続することで空間線量を測定可能な線量計（ポケットガイガー，Radition-Watch.org 製）も発売されている．このポケットガイガーが 0.05 μSv h^{-1} 地域において安定値を表示するまでの時間は，NaI（Tl）シンチレータを使用している TCS-172B（Hitachi Aloka Medica, Ltd 製）の約 100 倍かかるが，1 測定器当たりのコストは約 270 分の 1 である（Radiation-Watch.org, 2011）．溝口（2012a）はこのセンサを用いて，積雪により空間線量が低下することや晴天で乾燥した日には空間線量が高くなる傾向があることを報告している．そこで，本研究でもこのセンサを利用して土壌中の深度別の放射性セシウム濃度を捉えることができると判断し，測定器の開発に至った．

[1]Graduate school of Agriculture and Life Science, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo, Tokyo 113-8657, Japan. Corresponding author: 鈴木心也, 東京大学大学院農学生命科学研究科.
[2]High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan.
[3]School of Agriculture, Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama, Kanagawa, 214-8571, Japan.
[4]X-ability Co., Ltd., 3-16-6-801, Hongo, Bunkyo, Tokyo, 113-0033, Japan.
2013 年 5 月 4 日受稿　2013 年 11 月 8 日受理

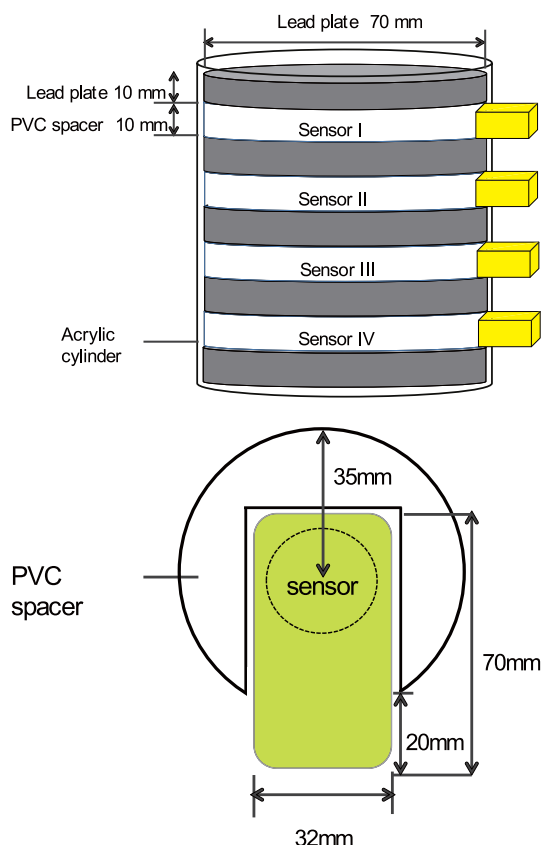



Fig. 1　放射能鉛直分布測定器模式図．(a) 全体図．(b) センサ部．
Schematic diagram of the device. (a) Overall view. (b) Sensor area.

土壌中に分布する放射性セシウムは全方位に放射線を放射するため，放射線量から深度別の放射性セシウム濃度を評価することは難しい．そのため，土壌放射能鉛直分布を測定可能な現場測定装置は，これまでに開発例がない．そこで，本研究では，遮蔽等に工夫を施し，測定範囲外の深度からの放射線の影響を考慮した土壌放射能鉛直分布の測定装置の開発を行った．

2. 材料と方法

2.1 放射能鉛直分布測定器

本研究では，放射線を検知するセンサとして，PIN フォトダイオード（VBPW34，Vishay 社製）を採用した．用いたセンサは, ポケットガイガー（Radiation-Watch.org 製）を一部改変した基板（長さ 70 mm，幅 32 mm，厚さ 10 mm）である．PIN フォトダイオードは，安価であり，性能劣化が起こりにくい利点がある．一方，このセンサは感度が高くないため，精度よく測定するためには時間をかけて測定する必要がある．

放射線は様々な方向に向かって放射されるので，各深さで濃度測定するためには，センサを設置した深さにおける放射線を捉えられるように指向性を高める必要がある．放射性セシウムが崩壊する際には β 線とともに γ 線が発生する．この γ 線は，粒子の流れである α 線や β 線とは異なり，電磁波であるために透過力が強く，遮蔽するためにはコンクリートや鉄，鉛など比重の高い物質を用いる必要がある（藤原, 2011）．そこで，本測定器では深さ毎の指向性を持たせるために，各センサの間に鉛板を挟み込んだ．

Fig. 1 は，設計した放射能鉛直分布測定器の模式図である．鉛板は直径 70 mm，厚さ 10 mm である．エポキシ樹脂でセンサ基板をコーティングし，防水性を持たせた．アクリル円筒内にセンサ基板と鉛板を入れ，鉛板及びアクリル円筒の遮蔽効果により，本測定器は γ 線のみを捉えることができる．測定器に組み込んだセンサを，変換基板（X-ability 社製）を介してデータロガー Em5b（Decagon 社製）に接続した．

2.2 本測定器の評価方法

開発した測定器を以下の 3 ステップで評価した．

2.2.1 点線源による指向性評価（漏れ係数）

点線源を用いてセンサの指向性を評価した（以下，指向性実験とする）．点線源は，^{137}Cs チェッキングソース（3 MBq）を用いた．指向性実験では，Sensor I から 10 mm 離した位置に点線源を置き，この位置を Position 1 とした．点線源と測定器を 10 mm 離したのは，本測定器は完全な円筒でないために現場の土壌に設置した際に少なからず隙間が空くこと，測定器の汚染防止のために用いる密閉式ビニルの厚みを考慮したからである．同様に，Sensor II から IV まで，それぞれ 10 mm 離れた位置を Position 2 から 4 とした．Position 1 から 4 のそれぞれの位置に点線源を置き，各センサの計数率（cpm）を求めた．センサの総計数が 3,000 カウントになるまで測定を継続した．

点線源から放射線は様々な方向に放射されているため，他位置の点線源もセンサへ影響を及ぼす．さらに鉛板を透過している γ 線も存在している．そのため，現地における深さ毎の指向性を持たせた放射性セシウム濃度の測定には，測定範囲以外からの放射性セシウム濃度を考慮する必要がある．そこで，本研究においては漏れ係数という概念を次式で定義した．

$$L_{\mathrm{ij}} = \frac{C_{\mathrm{j}}}{C_{\mathrm{i}}} \qquad (1)$$

ここで，L_{ij} は点線源が位置 i にある時のそれぞれのセンサ j の漏れ係数，C_{i} は ^{137}Cs 線源と同位置のセンサの計数率（cpm），C_{j} は ^{137}Cs 線源と他位置のセンサの計数率（cpm）である．$i = j$ の場合は $L_{\mathrm{ij}} = 1$ であり，$i \neq j$ の場合の漏れ係数 L_{ij} はそれぞれの漏れ成分の寄与として評価できる．すなわち，漏れ係数が小さいことは，指向性を持たせた測定を示し，一方，漏れ係数が大きいことは，線源 i とセンサ j の間の遮蔽が十分でないことを示す．

2.2.2 測定値の補正法（補正行列）

点線源実験から得られた漏れ係数が放射性セシウム濃度によらず一定で，それぞれの漏れ成分の線形和で計数率が与えられると仮定する．さらに，実際の汚染土壌のような連続した体積線源にも適用できるとすると，漏れ係数を用いて測定範囲外からの影響を考慮した関係式を

Table 1　漏れ係数行列.
Matrix of the leakage coefficients.

	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4
Sensor I	1.000	0.148	0.149	0.055
Sensor II	0.160	1.000	0.161	0.142
Sensor III	0.122	0.162	1.000	0.155
Sensor IV	0.039	0.140	0.143	1.000

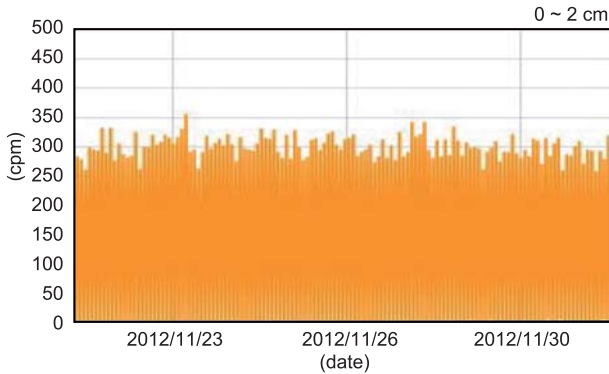



Fig. 2　土壌中の放射線量の測定例（0 ～ 2 cm）.
An example of observed radiation dose in soil（0 ～ 2 cm）.

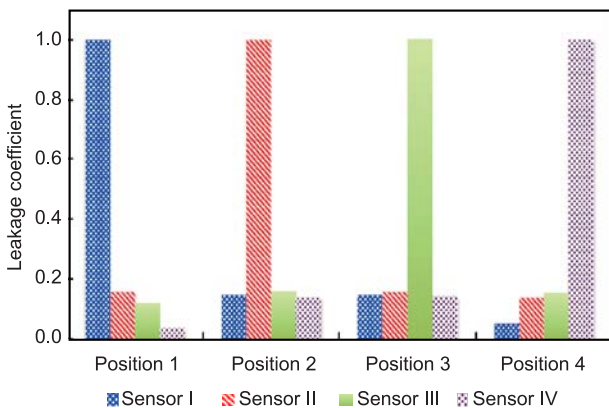



Fig. 3　各位置の漏れ係数.
Leakage coefficients at each position.

以下に表せる.

$$C_{\mathrm{mea}\,j} = \sum C_{\mathrm{cor}\,i} L_{ij} \tag{2}$$

ここで，$C_{\mathrm{mea}\,j}$ は本測定器を放射能汚染土壌に設置した時の Sensor I ～ Sensor IV の計数率（実測計数率），$C_{\mathrm{cor}\,i}$ は遮蔽漏れの影響を考慮した Sensor I ～ Sensor IV の計数率（補正計数率），L_{ij} は式（1）より得られた漏れ係数である．式（2）を並べて表示し，行列式を解くことで未知数である補正計数率を求めることができる．

2.2.3 フィールドにおける計数率評価

本測定器のフィールド試験を福島県相馬郡飯舘村佐須滑の水田で行った．飯舘村は，福島第一原発から 28 ～ 47 km に位置しているが，気象条件や地理的条件により，放射性物質の累積が局所的に生じている（菅野，2011）．そのため，事故発生から 1 年間の積算線量が 20 mSv に達する恐れのある「計画的避難区域」（経済産業省，2011）に属している．また，福島県の水田に特徴的な土壌群である灰色低地土およびグライ土が分布しており，スメクタイト，ゼオライト，雲母などの粘土鉱物を多く含んでいる（山口ら，2011）．そのため，本実験地においても放射性セシウムは豊富に存在する粘土鉱物に強く吸着され，水田の不撹乱土壌で行われた先行研究（塩沢ら, 2011: 奥島ら, 2012）と同様に表土付近のみにおいて放射性セシウム濃度が非常に高いと考えられる．

土壌採取は，まず表面を覆っていた植物を取り除き，採土器で土壌を採取した．採取した土壌は 2 cm 毎にヘラで区切り，実験室に持ち帰って湿重量あたりの放射性セシウム濃度を測定した．

測定器は，水田土壌に測定器と同程度の大きさの穴を移植ごてで掘り，測定器の各センサ部の厚さ 10 mm の中心が地表面からそれぞれ 1，3，5，7 cm に位置するように，表面の汚染土壌が下部へ落ちないように十分に注意しながら埋設した．そして，各センサが設置された深さから上下 10 mm を測定していると仮定した．その際，測定器の放射能汚染を防ぐため，測定器は密閉式ビニル袋に入れて設置した．4 つのセンサは変換基盤を介して，データロガー Em5b（Decagon 社製）に接続した．電源タイマーにより，30 分オンその後 90 分オフを繰り返すように設定し，タイマーオフの間に接続されたソーラーパネルにより，バッテリーの充電を行った．測定データは，1 日に 1 回フィールドルータ（溝口, 2012b）と通信してインターネット経由で回収した．測定期間は 2012 年 11 月 12 日から 2012 年 12 月 9 日であり，本研究ではある 1 日の測定間隔 30 分，12 回の測定データを代表値として本測定器の計数率を評価した．Fig. 2 に測定値の一例を示す．

3. 結果と考察

3.1 漏れ係数行列

Fig. 3 に，センサ別で点線源と同位置のセンサの計数率と他位置のセンサの計数率の比を漏れ係数として示した．各鉛板の厚さ 10 mm である本測定器では，他位置の点線源の影響を 0.06 ～ 0.16 程度受けることが観察された（Fig. 3）．この結果から，漏れ係数行列は Table 1 のようにまとめられる．

3.2 補正法の評価

Fig. 4 は，福島県飯舘村の水田の不撹乱土壌における採取土壌より得られた地表面から深さ 2 cm 毎の放射性セシウム濃度と実測計数率，補正計数率の関係を示したものである（ただし採取土壌は湿重量にて測定）．深さ毎の採取土壌の放射性セシウム濃度は，地表面付近の濃度が高く，地表面から深くなっていくにつれて大幅に低くなった．この結果は，福島原発事故後に耕起や稲作の行われていない水田の不撹乱土壌（塩沢ら, 2011: 奥島ら, 2012）における深度別の放射性セシウム濃度の傾向と一致している．また，実測計数率は地表面付近で最も大きく，深くなっていくにつれて緩やかに小さくなった．こ

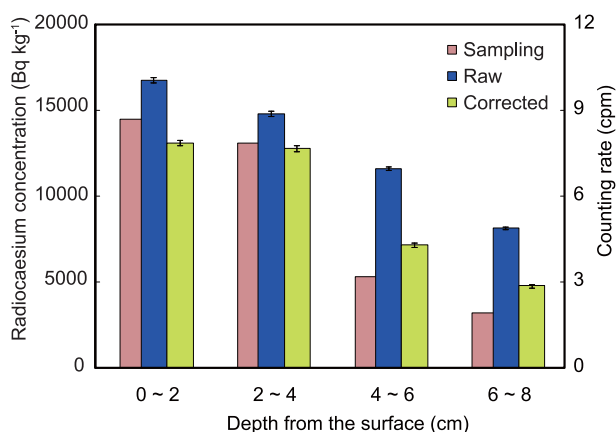



Fig. 4　福島県飯舘村における水田の不撹乱土壌での深度別の放射性セシウム濃度分布 (Sampling) および実測計数率 (Raw)，補正計数率（Corrected）の比較（採取土壌は湿重量にて測定．第一縦軸は放射性セシウム濃度，第二縦軸はセンサの計数率とした）.
Comparison between radiocaesium concentration at each depth level in undisturbed soil of paddy field in Iitate village, Fukushima and raw and corrected couting rates (Samples were measured in wet weight).

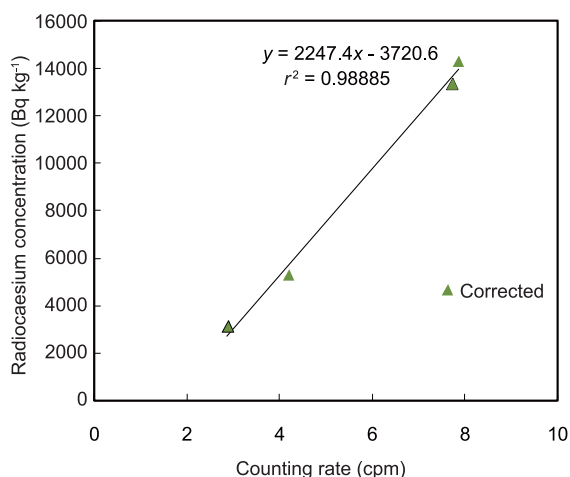



Fig. 5　採取土壌の分析により求めた放射性セシウム濃度および深度別の補正計数率の関係.
Relationship between radiocaesium concentration by soil sampling and corrected counting rate.

の原因として，鉛板の遮蔽が十分でなかったことによる漏れの影響が考えられる．それに対して，補正計数率は地表面からの深さ 0 ～ 2，2 ～ 4 cm までの計数率は大きいが，深さ 4 ～ 8 cm では実測計数率と比較するとかなり小さな値となった．ここで生じた差が補正式によって考慮した漏れの寄与である．そして，採取土壌の放射性セシウム濃度を真値とすると，補正計数率は実測計数率と比較して採取土壌から得られた深さ 2 cm 毎の放射性セシウム濃度と近い傾向を示すことを確認することができた.

Fig. 5 は，採取土壌より得られた地表面から深さ 2 cm 毎の放射性セシウム濃度と補正計数率の関係を示したものである（ただし採取土壌は湿重量にて測定）.

そこで補正計数率を x 軸に，採取土壌から得られた深さ毎の放射性セシウム濃度を y 軸に設定することで本計測器における関係式を求めた（Fig. 5）.

$$y = 2247.4x - 3720.6 \qquad (r^2 = 0.98885) \qquad (3)$$

その結果，提案した補正式により得られた補正計数率と採取土壌の放射性セシウム濃度から直線関係を得ることができた．すなわち，漏れ係数を評価し，提案した補正式を用いて他位置からの放射線の影響を正しく補正することにより，深さ毎の放射性セシウム濃度を現場で精度良く測定することが可能となった．また，この関係式に従うと，補正計数率が 1.66 cpm の時に 0 Bq kg^{-1} を示すことになるが，自然放射線の影響を考慮すれば，この結果は妥当であると考えられる.

4. おわりに

本研究では，放射能汚染された土壌において，深度別放射性セシウム濃度分布を推定する測定器を開発した．本測定器は，遮蔽効果の高い鉛を用いて，センサに深度別に指向性を持たせたことが特徴である．しかし，鉛板は有限の大きさのために完全な遮蔽は難しい．センサに漏れ込む放射線の影響を漏れ係数として評価し，提案した補正行列を適用すること各深さの実測計数率を補正した．その結果，補正計数率と採取土壌による深度別の放射性セシウム濃度は高い相関関係を示し，現場において放射性セシウム濃度分布を精度良く測定できることを確認できた.

今後，精度よく短時間で測定を行うためには，従来から放射線を検知するセンサとして用いられている GM 管を使用し，測定器を開発することが考えられる．また，PHITS（Particle and Heavy Ion Transport code System）という任意形状の 3 次元体系内における放射線挙動を解析可能な汎用モンテカルロ計算コードを採用し（佐藤，2011），土壌水分や乾燥密度の遮蔽効果も考慮しながら，厳密な設計を行うことで，より精度の高い補正が可能になると思われる．いずれにせよ，土壌中の放射性セシウムの長期的なモニタリングも念頭において，本研究で開発した測定器を改良していくことが重要である.

謝辞

本研究を進めるにあたり，吉見弘道博士（高エネルギー加速器研究機構），田野井慶太朗准教授（東京大学農学生命科学研究科），菅野宗夫氏（飯舘村農業委員会），ふくしま再生の会の皆様 に，多大なご助言とご協力を頂いた．査読者の方々には原稿の改訂で多くのご意見，ご助言を頂いた．また，本研究は，2011 年度明治大学震災復興・防災研究プロジェクトの助成を受けて実施した．ここに記して，謝意を表する.

引用文献

Chiu, C.Y., Wang, C.J., Huang, C.C. (2008): Availability and immobilization of ^{137}Cs in subtropical high mountain forest and grassland soils. J. Environ. Radioact., 99: 882–889.

藤原和信 (2011): 基本を知る　放射能と放射線. pp. 48–49, 誠文堂新光社, 東京.

菅野典雄 (2011): 美しい村に放射能が降った　飯舘村長・決断と覚悟の 120 日. pp. 28–34, ワニプラス, 東京.

経済産業省 (2011):「計画的避難区域」及び「緊急時避難準備区域」の設定について. http://www.meti.go.jp/press/2011/04/20110422004/20110422004-2.pdf (Accessed 29 Jan. 2013)

Kruyts, N. and Delvaux, B. (2002): Soil organic horizons as a major source for radiocesium biorecycling in forest ecosystems. J. Environ. Radioact., 58: 175–190.

溝口　勝 (2012a): 農地と除染の新たな試み. 学術の動向, 10: 52–56.

溝口　勝 (2012b): フィールドモニタリングシステム. 水土の知, 80: 50.

中尾　淳 (2012): セシウムの土壌吸着と固定. 学術の動向, 10: 45.

奥島修二, 塩野隆弘, 石田　聡, 吉本周平, 白谷栄作, 濱田康治, 人見忠良, 樽屋啓之, 今泉眞之, 中　達雄 (2012): 浅代かき強制排水による水田土壌中の放射性物質の除去法の有効性に関する事前検討. 土壌の物理性, 121: 43–48.

Radiation-Watch.org (2011): 感度について. http://www.radiation-watch.org/2011/05/accuracy.html (Accessed 7 Oct. 2013)

佐藤達彦 (2011): PHITS コードの公開と開発の現状. RIST ニュース, No. 51.

塩沢　昌, 田野井慶太朗, 根本圭介, 吉田修一郎, 西田和弘, 橋本健, 桜井健太, 中西友子, 二瓶直登, 小野勇治 (2011): 福島県の水田土壌における放射性セシウムの深度別濃度と移流速度. Radioisotopes, 60: 323–328.

Tamura, T. (1964): Selective sorption reaction of caesium with mineral soils. Nuclear Safety, 5: 262–268.

山口紀子, 高田裕介, 林健太郎, 石川　覚, 倉俣正人, 吉川省子, 坂口　敦, 朝田　景, 和穎朗太, 牧野知之, 赤羽幾子, 平舘俊太郎 (2012): 土壌 – 植物系における放射性セシウムの挙動とその変動要因. 農環研報, 31: 75–129.

要　　旨

土壌を採取し，深さ毎に放射性セシウム濃度を測定するには多大な労力と時間がかかる．そこで，本研究では現場で放射性セシウム濃度の鉛直分布を測定する装置を開発した．放射線を検出する 4 つのフォトダイオードセンサを鉛板で挟み，深度別で指向性を高めた．しかし，指向性は十分ではないため，点線源実験により測定範囲外からの影響度合いを示す漏れ係数を独自に定義し，補正行列を提案した．福島県飯舘村の不撹乱水田において本測定器を試験したところ，土壌放射能の鉛直分布がほぼ正確に測定できることが確認できた．

キーワード：放射性セシウム，鉛直放射能分布，フォトダイオード，漏れ係数行列，除染

J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 125, p.35 ～ 41 (2013)

古典を読む

J.D. Rhoades, P.A. Raats and R.J. Prather 著「液相の電気伝導率，土壌水分量と土粒子表面の電気伝導率が土壌の電気伝導率に及ぼす影響」

柳井洋介 [1]・宮本輝仁 [2]・取出伸夫 [3]

Reviewing classical studies in soil physics

"Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity" by J.D. Rhoades, P.A. Raats and R.J. Prather, Soil Sci. Soc. Am. J., 40: 651–655 (1976)

Yosuke YANAI[1], Teruhito MIYAMOTO[2] and Nobuo TORIDE[3]

1. はじめに

近年，電磁波を用いたセンサーの開発が進み，土壌試料中の体積含水率 θ と電気伝導率 EC が同時に測れるようになった．その代表的なものは Time Domain Reflectometry（TDR）である．TDR では電磁波の伝播時間と減衰割合を利用して比誘電率に基づく θ と電気抵抗に基づく EC を測定している．また，TDR とは異なる測定原理で θ と EC を同時に測定する様々なセンサーも急速に普及している．Decagon 社の 5TE や Delta-T 社の WET センサーがその代表的な計器類である．これらのセンサーや TDR で測定される EC は土壌の EC（以下 EC_a）であり，水溶性塩類の濃度だけでなく、土壌水分量にも依存する．そのため，同じ土壌試料中の θ と EC_a が同時に測れることは，土壌溶液の EC（以下 EC_w）を推定し，それをもとに水溶性塩類の濃度を推定する際に大きな利点となる．これら計器類の取扱説明書の一部には，EC の測定原理とともに，測定された土壌の θ と EC_a から EC_w を推定する方法として Rhoades モデルが記されている．土壌の θ と EC_a を同時に測定する様々なセンサーを活用するためには，この Rhoades モデルの理解が必要である．Rhoades モデルは，任意の水分量 θ における 4 極法による塩類土壌の EC_a 測定から，EC_w を推定するモデルであるが，TDR などにより θ と EC_a を同時に精度よく測定できる現在，Rhoades モデルの重要性はより高まっている．

Rhoades モデルを提案した Jim Rhoades 博士は，アメリカ合衆国農務省塩類研究所（U.S. Salinity laboratory）の土壌化学のグループにおいて，土壌の塩類濃度（soil salinity）測定一筋で研究をおこなった人物である．彼は，4 極法を塩類土壌の EC 測定に本格的に導入した．例えば，実験室内で使う小さな容器に電極を挿入する規模からトラクターの後部に大きな電極を配置した野外計測規模の異なる大きさのセンサーを作製し，塩類土壌の EC_a 測定を精力的に行った．当時，圃場で用いられていたセンサーは 1 cm 四方のセラミック板を通過した土壌溶液に対して EC を測定するもので，測定範囲が局所的であった（Richards, 1966）．そのため，根群域の塩類濃度を推定するには，多数のセンサーを設置する必要があった．そこで，電極の配置間隔を適切に設定することにより根群域全体の平均的な EC_a の測定が行える 4 極法を適用した．そして，1971 年には電気抵抗測定による圃場での塩類調査法の論文を発表した（Rhoades and Ingvalson, 1971）．

同じ頃，Gupta and Hanks（1972）は，4 極法による EC_a の水分量依存性に注目して，土壌の塩類濃度の指標として用いられていた飽和抽出（saturation extract）による EC（以下 EC_e）と 1 : 5 水浸出法による EC（以下 $EC_{1:5}$）に対して，次の経験式を得た．

$$\frac{EC_a}{EC_e} \quad \text{または} \quad \frac{EC_a}{EC_{1:5}} = a\theta + b \qquad (1)$$

ここで，a と b は実験により決定される土壌固有の定数

[1]NARO Institute of Vegetable and Tea Science, 3-1-1 Kan-nondai, Tsukuba, 305-8666, Japan. Corresponding author: 柳井洋介, 農研機構野菜茶業研究所.
[2]NARO Institute for Rural Engineering, 2-1-6 Kan-nondai, Tsukuba, 305-8609, Japan.
[3]Graduate School of Bioresources, Mie University, 1577 Kurima-Machiya, Tsu, 514-8507, Japan.
2013 年 10 月 22 日受稿　2013 年 11 月 25 日受理

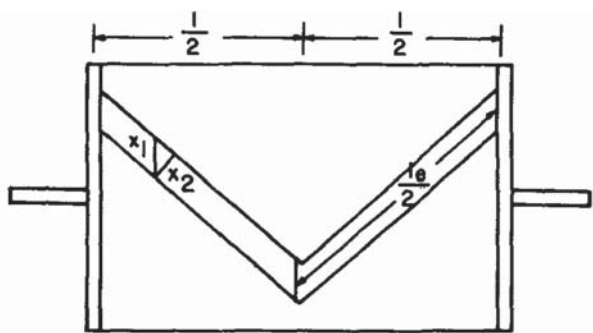



Fig. 1 伝導率セル中の土壌 – 間隙組織の模式図.
Schematic of soil-pore system in conductivity cell.
(Rhoades et al., 1976, Fig. 1)

である．この関係式により，EC_a と同時に θ の測定が可能であれば，瞬時に EC_a から EC_e や $EC_{1:5}$ を推定することが可能となった．しかし，Rhoades らは Gupta and Hanks（1972）の経験式に対して，(1) 攪乱試料で得られた校正式であり，現場圃場への適用が難しいこと，(2) EC_a を測定した θ とは異なる水分量で決定する土壌の塩類濃度（EC_e や $EC_{1:5}$）に対する関係式であること，(3) 固相表面の EC や土壌溶液が満たされている間隙の屈曲の影響を考慮していないことを問題点として指摘した．この Gupta and Hanks（1972）の経験式をもとに，より厳密なモデルを構築し，精密な実験により検証したのが，今回紹介する Rhoades et al.（1976）の論文である．そこで本稿では，EC_a–θ–EC_w 関係を築いた Rhoades et al.（1976）を取り上げ，モデルが導出された経過を再確認するとともに現在までの関連する議論を概観したい．

2. モデルの導出

不飽和土壌は三相（気相，液相，固相）から成る．このうち気相と，固相を形成する多くの鉱質物質は絶縁体である．これに対して，固相の一部（主に粘土）と液相は導体である．Rhoades et al.（1976）では，土壌の液相と固相の電気抵抗が並列関係にあって土壌の電気抵抗を形成しているとみなした．すなわち，土壌の電気抵抗の逆数から求められる土壌の電気伝導率 EC_a は，液相の寄与分である EC_b と交換性陽イオンによる固相表面の寄与分である EC_s の和で表現できるとした．

$$EC_a = EC_b + EC_s \tag{2}$$

そして，EC_b は土壌溶液の電気伝導率 EC_w と土壌間隙構造に関係する．EC_b は EC_w に比例し，全横断面中の液相部分の伝導であると仮定し，EC_w，断面割合を与える θ，透過係数 T の積で表現し，(2) 式を次式に書き換えた．

$$EC_a = EC_w \theta T + EC_s \tag{3}$$

ここで，透過係数 T は，屈曲度の効果と固液・気液界面近傍でのイオンの移動度を表現し，(1) 式と同様に θ に比例すると仮定した．

$$T = a\theta + b \tag{4}$$

ここで，a と b は定数であり，(1) 式と同じ記号が用いられている．(3) 式において，EC_a の水分量依存性を断面割合と透過性の効果に二分し，透過性の効果に対して Gupta and Hanks（1972）の経験式を適用した点が Rhoades らのオリジナリティである．そのため，(3) 式における EC_a は，θ の 2 次式となる点が特徴である．また，ソーダ質土壌以外では，EC_s は土壌溶液の塩類濃度や水分量に依存せずに一定と見なせることから，(3) 式は，EC_w あるいは θ がゼロに近づくと EC_b はゼロに近づき，その結果として，EC_a は EC_s に近づくことを述べている．このように，EC_a が測定されるときの土壌溶液の EC_w に対して，θ の効果をより精密に考慮し，さらに EC_a に対して EC_s を考慮した点が Gupta and Hanks（1972）のモデルからの進展である．

さらに Rhoades et al.（1976）は，毛管モデル（Porter et al., 1960）から (3) 式の水分量依存性を，Fig. 1 に示す概念図を用いて視覚化した．断面積が A，高さ l の土壌円筒があるとし，液相で占められる部分の断面積 x_2，間隙の長さを l_e とするとき，θ は次式で表せる．

$$\theta = \frac{x_2 l_e}{Al} \tag{5}$$

このとき，土壌円筒中の液相のバルクの電気抵抗 R_b は次のように表せるだろう．

$$R_b = \rho_w \frac{l_e}{x_2} = \frac{1}{EC_w}\frac{l_e}{x_2} \tag{6}$$

ここで ρ_w（$=1/EC_w$）は間隙中の液相の比抵抗である．(6) 式に (5) 式を代入し，水の粘性 γ の影響を導入して EC_w について整理する．

$$EC_w = \left(\frac{1}{\gamma}\right)\left(\frac{l_e}{x_2}\right)\frac{1}{R_b} = \left(\frac{1}{\gamma}\right)\frac{(l_e)^2}{l\theta A}\frac{1}{R_b} \tag{7}$$

更に次のように書き直す．

$$EC_w = \frac{1}{\theta}\left[\frac{1}{\gamma}\left(\frac{l_e}{l}\right)^2\right]\left(\frac{l}{A}\right)\frac{1}{R_b} \tag{8}$$

(8) 式中の $\left[1/\gamma(l_e/l)^2\right]$ は透過係数 T の逆数であり，(l_e/l) は屈曲度，(l/A) は伝導率測定用電極の形状や配置を反映したセル定数と解釈できる．ここでセル定数を G とすると，(8) 式は次式で表現できる．

$$EC_w = \frac{G}{\theta T R_b} \tag{9}$$

交換性陽イオンによる固相表面の伝導性を考慮し，液相と固相のそれぞれの伝導経路が並列に接続していると仮定し，次式を得る．

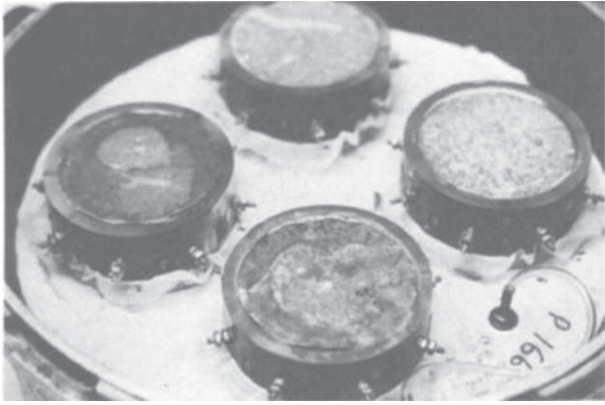



Fig. 2　土壌を詰めた 4 極子セルを加圧板装置内に置き，脱水させながら水分調整を行う様子.
Soil-filled four-electrode cells, positioned in pressure plate apparatus for adjustment of water content.
(Rhoades et al., 1976, Fig. 2)

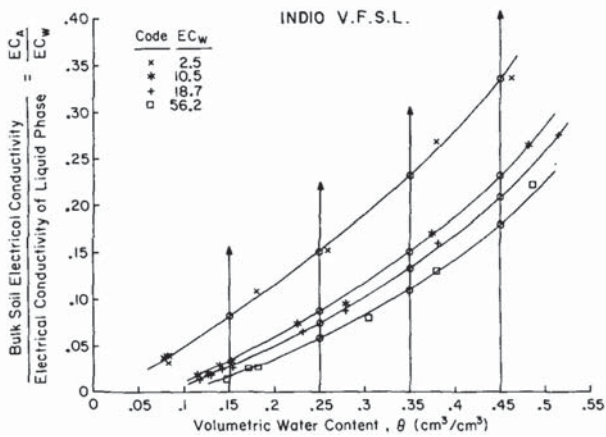



Fig. 3　Indio vfsl の体積含水率 θ と EC_a/EC_w の関係.
Plot of bulk soil electrical conductivity/liquid phase electrical conductivity, EC_a/EC_w, vs. volumetric water content, θ, for Indio vfsl. (Rhoades et al., 1976, Fig. 3)

$$\frac{1}{R_a}=\frac{1}{R_b}+\frac{1}{R_s} \tag{10}$$

ここで，R_a と R_s はそれぞれ土壌の電気抵抗と固相に起因する電気抵抗である．加えて，(10) 式の各項ともセル定数は一様であると仮定する．

$$EC_aR_a=EC_bR_b=G \tag{11}$$

(9) ～ (11) 式を併せると (2) 式と同じ式が導かれる．

$$EC_a=EC_w\theta T+EC_s \tag{12}$$

Rhoades 博士らはどうして同じ式を 2 通りの方法で導出してみせたのだろうか．おそらく最初の導出過程が感覚的なところがあり，精確さに欠ける印象があったためと推察される．ところで，第二著者の Peter Raats 博士は，この論文が書かれた 1970 年代に塩類研究所に研究員として所属し，その後，ワーゲニンゲン農科大学に移ったオランダ人研究者であり，数学と物理学に秀でた理論家である．Rhoades 博士と Raats 博士の接点はこの論文のみであることから，当時，新進気鋭の研究者であった Raats 博士の貢献がここに表れているように感じられる．このようにして (3) 式の Rhoades モデルは，「伝導経路が並列に接続していること」と「セル定数が一様」と仮定することにより理論的に裏付けられたことが (12) 式からわかる．

3. モデル係数の決定のための実験

(3)，(4) 式を用いて EC_a を EC_w と EC_s の関数として表記するため，Rhoades 博士らは不攪乱試料を用いて，EC_w と体積含水率 θ が既知の条件で EC_a を測定した．

内径 7.5 cm，高さ 3.9 cm の円筒容器に採取された 4 種類の不攪乱土壌試料を試験に供した．この円筒容器の側面に 45° 間隔で 8 本の電極を挿入し，隣どうしの電極 4 本を用いた測定を行い，1 本ずつずらして 8 回の EC_a を測定し，その平均値を測定値とした．測定機器類の詳細および電極のセル定数の決定方法は，Rhoades et al. (1977) に示されている．また，用いた 4 種類の EC_w の溶液の濃度は，SAR ＝ 4 (sodium adsorption ratio ; Na 吸着比) として調整した．SAR は溶液中の 2 価の陽イオンとナトリウム (Na^+) の補正濃度比であり，SAR が一定であれば，濃度が異なっても交換性陽イオン組成が等しいと見なせる．SAR ＜ 7 の灌漑水であれば土壌をソーダ質化させる危険性が低いとされており (Bolt and Bruggenwert, 1989)，SAR ＝ 4 は，交換性 Na^+ が小さい条件である．そして，土壌試料を加圧板装置により脱水させながら水分調整を行った (Fig. 2)．

こうして間隙構造を乱していない不攪乱土壌試料の EC_a，θ，EC_w の関係を求めた．測定した 4 種類の土壌の θ，マトリックポテンシャル，EC_w 値の範囲は，原著の Table 2 に示されている．

4. モデル係数の決定

Rhoades モデルの係数を決定するために，(3) 式の各項を EC_w で除して変換する．

$$\frac{EC_a}{EC_w}=T\theta+\frac{EC_s}{EC_w} \tag{13}$$

そして，θ に対する EC_a/EC_w の測定値のプロットが Fig. 3 である．(13) 式は (1) 式と同様の形式であるが，Gupta and Hanks (1972) の直線関係ではなく，曲線の関係である．そのため，θ が 0 のときの EC_a/EC_w の値が判然としない．そこで，Fig. 3 において 4 段階の θ に対して EC_w と EC_a を近似曲線から読み取った値の関係が Fig. 4 である．この関係に対して EC_w を 0 まで外挿すると，(3) 式より EC_s が得られる．このようにして求めた Rhoades モデルの EC_s は，原著の Table 3 に示されている．

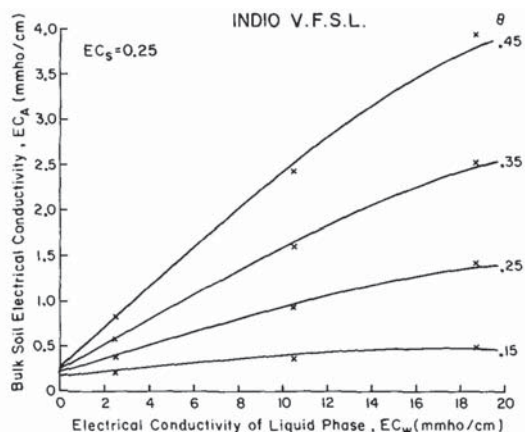



Fig. 4　異なる体積含水率 θ のときの土壌溶液の電気伝導率 EC_w と土壌の電気伝導率 EC_a の関係．Fig. 3 より体積含水率を固定して求めた．また，y 軸との切片は土粒子表面の電気伝導率 EC_s を表す．
Plot of bulk soil electrical conductivity, EC_a, vs. liquid-phase electrical conductivity, EC_w, for various fixed volumetric water contents as interpolated from Fig. 3 Indio vfsl showing the extrapolated value of surface conductivity, EC_s.
(Rhoades et al., 1976, Fig. 4))

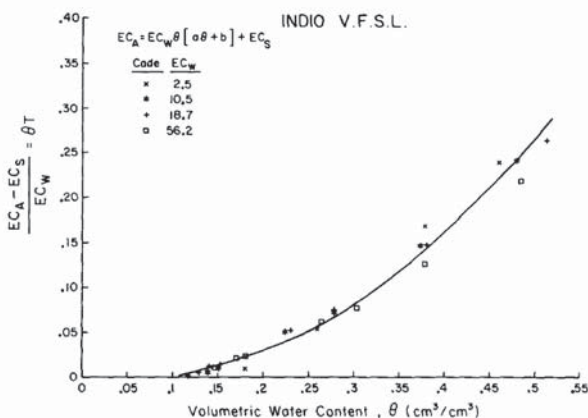



Fig. 5　Indio vfsl の体積含水率 θ と $(EC_a-EC_s)/EC_w$ の関係．曲線は Fig. 6 で求めた a と b の値を用いて（2），(3) 式（原著（5），(6) 式）により求めた．
Plot of bulk soil electrical conductivity-surface conductivity/ liquid-phase electrical conductivity, $(EC_a-EC_s)/EC_w$, versus volumetric water content, θ, for data of Fig. 3 and 4 compared to the curve calculated from Eq. (5) and (6) with the values of a and b determined from Fig. 6.
(Rhoades et al., 1976, Fig. 6)

EC_s が決定したので，その値を用いて今度は θ に対する $(EC_a-EC_s)/EC_w$ をプロットする（Fig. 5）．Fig. 3 では EC_w 毎の近似曲線が必要であったが，Fig. 5 では，一つの曲線に収束した．これは，EC_s が土壌溶液の塩濃度と水分量に依存しないとした仮定の妥当性を示す．

さらに，透過係数 T を与える $(EC_a-EC_s)/(EC_w\theta)$ と θ の関係をプロットしたのが Fig. 6 である．この結果は，T を θ の 1 次式と仮定した（4）式の妥当性を検証している．傾きと切片から（4）式の a と b が求められる．このように，非常に高い相関係数の直線が得られたことは，モデルの妥当性のみならず，細心の注意を払った丹念な実験の繰り返しにより生まれたことは間違いない．まさに Rhoades 博士の研究に対する姿勢が伺える結果である．

Rhoades 博士らの実験で用いた土壌試料について得られたモデルの係数を Table 1 に示す．（4）式より，$\theta=-b/a$ のとき $T=0$ となる．Rhoades らは $\theta_t=-b/a$ を限界体積含水率（threshold water content）と定義し，この体積含水率より高い土壌水分のときのみモデルが適用可能であるとした．推定された θ_t は 0.1 程度であり，適用範囲を圃場容水量程度の高水分領域とした Rhoades and Ingvalson（1971）の報告に比べて，低水分領域での妥当性を確認した．

5. Rhoades et al. (1976) 発表後

（4）式の a，b が一定であれば，θ 一定の場合，EC_a–EC_w は線形関係となる．そのため，ここまで示したモデルは，以下に示す改良モデルに対して線形モデルと呼ばれる．a，b が一定であることを検証した Fig. 6 は，比較的溶液濃度が高い領域での実験で得られた関係である．一方，土壌溶液濃度が低下すると，拡散二重層を含む固相表面の影響が相対的に大きくなり，イオン濃度や組成の変化は（4）式の a，b を変化させる．そのため，イオン濃度が低い領域において，EC_w のどの範囲まで EC_a–EC_w 関係が線形性を有するかが議論されてきた．Rhoades et al.（1976）では，2.5 ～ 56 dS m^{-1} の EC_w 範囲で EC_a–EC_w 関係の線形性の成立を実験的に示したが，その後の研究では，おおよそ 4 dS m^{-1} 以下の EC_w の範囲では EC_a–EC_w 関係が非線形となることが報告された（Shainberg et al., 1980; Nadler and Frenkel, 1980）．EC_w の低い範囲では固相と液相が直列に接続された伝導経路を並列モデルに組み込むことにより表現できると考えられた（Shainberg et al., 1980）．しかし，導入された幾何パラメータには，物理化学的または鉱物学的な意味付けはなかった．

Rhoades et al.（1989）は，動水（連続的な液相部分）と不動水（間隙中に保持され不連続な液相部分）の概念を導入した改良モデルを提案した．このモデルでは，次の 3 つの伝導経路を仮定している．すなわち，(1) 固相と液相が直列に接続された伝導経路（微細間隙中の液相を想定），(2) 固相のみの伝導経路（土粒子表面の伝導を想定），(3) 連続的な液相部分の伝導経路（粗間隙中の液相を想定）である．

$$EC_a=\left[\frac{(\theta_{ss}+\theta_{ws})^2 EC_{ws}EC_s}{\theta_{ss}EC_{ws}+\theta_{ws}EC_s}\right]+\theta_{sc}EC_s+\theta_{wc}EC_{wc} \tag{14}$$

ここで，θ_{ws} は固相と液相が直列に接続された伝導経路の体積含水率，θ_{wc} は連続的な液相部分の体積含水率，θ_{ss} は固相と液相が直列に接続された伝導経路の固相の体積割合，θ_{sc} は固相のみの伝導経路の固相の体積割合，

Table 1 供試土壌について得られたモデル係数.
Determined surface conductivities, transmission coefficient parameters, and threshold water contents of soils studied. (Rhoades et al., 1976, Table 3)

Soil type	EC_s	A	b	θ_t	R
	dS m^{-1}				
Pachappa fsl	0.18	1.382	−0.093	0.07	0.96
Indio vfsl	0.25	1.287	−0.116	0.09	0.98
Waukena l	0.4	1.403	−0.064	0.05	0.97
Domino cl	0.45	2.134	−0.245	0.12	0.92

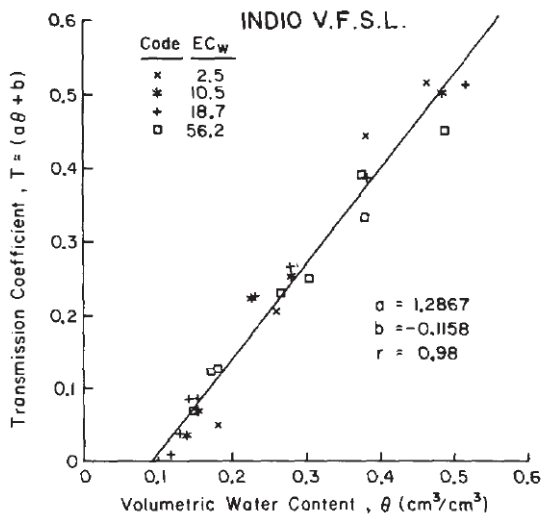



Fig. 6 Indio vfsl の体積含水率 θ と透過係数 T の関係. Fig. 3，4 と（12）式（原著（15）式）から求めた.
Relation of the transmission coefficient, T, and volumetric water content, θ, determined for Indio vfsl from the data of Fig. 3 and 4 and Eq. (15). (Rhoades et al., 1976, Fig. 6)

EC_{ws} と EC_{wc} は固相と液相がそれぞれ直列，並列に接続された伝導経路の液相の電気伝導率である.

しかし，固相のみの伝導経路の EC_a に対する寄与は小さいため，土粒子間の接続部のみを通じた導電を無視することにより，簡略化したモデルも提案した.

$$EC_a = \left[\frac{(\theta_s + \theta_{ws})^2 EC_{ws} EC_s}{\theta_s EC_{ws} + \theta_{ws} EC_s}\right] + (\theta_w - \theta_{ws}) EC_{wc} \quad (15)$$

ここで，θ_s は固相の体積割合，$(\theta_w - \theta_{ws})$ は連続的な液相部分の体積割合である．このモデルは土壌の各電気抵抗の並列接続を仮定したモデル（(3) 式）に比べて適用性が高く，特に EC_w の低い範囲（おおよそ 4 dS m^{-1} 以下の EC_a–EC_w 関係が非線形となる範囲）で EC_a–EC_w 関係をよく表現できる．しかし，取得が難しい経験的パラメータが増えてしまったため，その利用が制限される.

Rhoades 博士は長年行ってきた研究をもとに 1999 年に塩類土壌の評価方法を FAO Manual にまとめている（Rhoades et al., 1999）．その中では，EC_a から EC_w を推定するモデルとして非線形モデルである（14）式を紹介している．また，EC_a の測定方法として 4 極法の他，Rhoades も長年開発にかかわってきた電磁誘導法（Rhoades, 1992）についても紹介されている.

他方，Dalton et al.（1984）によって TDR で土壌水分量と EC_a の同時計測の可能性が示されると，溶質移動研究への TDR の応用が始まった．そして，TDR で計測される EC_a を用いて溶質濃度を推定する試みも行われた．特に野外計測では，土壌水分量も経時的に変化するため，TDR で計測される θ と EC_a から EC_w を推定することができれば，EC_w と溶質濃度の時間変化を明らかにすることができる．このような理由から，TDR を用いて非定常過程での溶質移動研究を行っている研究者から EC_a–θ–EC_w 関係に再び大きな関心が注がれ（Ward et al., 1994; Heimovaara et al., 1995; Mallants et al., 1996; Risler et al., 1996），最も単純な Rhoades モデルがよく利用されるようになった（Bhabani et al., 1999; De Neve et al., 2000; Muñoz-Carpena et al., 2005）．現在では，Rhoades et al.（1976）の線形モデルは，いくつかの商品化された水分センサーのプログラムにも組み込まれている.

6. おわりに

「土壌の物理性」でもたびたび解説されるように，土壌中の水分・電気伝導率の原位置同時測定は長年切望されてきた課題である（堀野・丸山, 1992; 登尾, 2003）．Rhoades モデルが考案された当時は，4 極法による EC_a 測定値から任意の水分条件に対し EC_w を推定する実用のための理論の確立が主たる目的であった．そのため，丹念な実験が繰り返し行われ，理論的な裏付けも得ながら Rhoades モデルが提案された．その後，TDR をはじめ各種センサーで土壌試料の θ と EC_a を同時に測定できるようになり，再び Rhoades モデルが脚光を浴びることになる．「古典」とは書かれた時代の要請に応えるのみならず，その後の新しい展開の中でも回顧されうる何かを持っているものである．そのような意味で，Rhoades et al.（1976）は古典と呼ぶに相応しい論文の一つであると考える.

近年，EC_a の計測に基づいた EC_w の推定は，土壌物理学の専門家でなくても可能となる基盤が整いつつある．しかし，このような事態は「土壌固相の電気伝導率（EC_s）は 0.25 dS m^{-1} が提案されている」といった数値の一人歩きを誘発しうる．本稿で読み起こした通り，Rhoades 博士らが示した EC_s は，現場で採取した試料そのものの値ではなく，不攪乱試料に電解質溶液で調整操作を施した試料の値である．EC_s は水分量や土壌溶液中の塩類濃度に依存しないことは実験的に示されているが，Rhoades et al.（1976）の Table 2 中の CEC と Table 3 中の EC_s が有意な正の相関を示すことから，ソーダ質化していない土壌については，交換性陽イオン量に依存して高くなることが予想される．また，ソーダ質化した土壌ではさらに高い値を示すこともあると考えられ，「EC_s

は 0.25 dS m^{-1}」のみに注目することのないように留意されたい.

最後に，わが国の土壌で EC_a–θ–EC_w 関係を実験的に取得した例が少なく，砂丘砂（井上・塩沢, 1994; Deghghanisanij et al., 2004）と火山灰土壌（Miyamoto et al., 2010; 植松ら, 2012）などに限られている．今後，土壌物理学会員によって，わが国の土壌についても EC_a–θ–EC_w 関係の特徴が解明され，Rhoades モデルの適用性の検討や改良，汎用計算プログラムの提案等に発展していくことが期待される.

謝辞

本稿の執筆にあたり，原口暢朗博士より粘土の化学性についての貴重なご助言を賜った．岩田幸良博士には初期の原稿に対して一緒に議論していただいた．記して深く謝意を表す.

引用文献

Bhabani, S.D., Wraith, J.M. and Inskeep, W.P. (1999): Nitrate concentrations in the root zone estimated using time domain reflectometry. Soil Sci. Soc. Am. J., 63: 1561–1570.

Bolt. G.H. and Bruggenwert, M.G.M (1989): 土壌の化学（岩田進午, 三輪睿太郎, 井上隆弘, 陽　捷行 訳）, pp. 191–212, 学会出版センター, 東京.

Dalton, F.N., Herkelrath, W.N., Rawlins, D.S. and Rhoades, J.D. (1984): Time-domain reflectometry: Simultaneous measurement of water content and electrical conductivity with a single probe. Science, 224: 989–990.

Dehghanisanij, H., Yamamoto, T. and Inoue, M. (2004): Practical aspects of TDR for simultaneous measurements of water and solute in a dune sand field. 土壌の物理性, 98: 21–30.

De Neve, S., Van De Steene, J., Hartmann, R. and Hofman, G. (2000): Using time domain reflectometry for monitoring mineralization of nitrogen from soil organic matter. Eur. J. Soil Sci., 51: 295–304.

Gupta, S.C. and Hanks, R.J. (1972): Influence of Water Content on Electrical Conductivity of the Soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 36: 855–857.

Heimovaara, T.J., Focke, A.G., Bouten, W. and Verstraten, J.M. (1995): Assessing temporal variations in soil water composition with time domain reflectometry. Soil Sci. Soc. Am. J., 59: 689–698.

堀野治彦, 丸山利輔 (1992): TDR による土壌の体積含水率および電気伝導度の測定について. 土壌の物理性, 65: 55–61.

井上光弘, 塩沢　昌 (1994): 4 極法による土壌カラム内の電気伝導度測定とその応用. 土壌の物理性, 70: 23–28.

Mallants, D., Vanclooster, M., Toride, N., Vanderborght, J., van Genuchten, M.Th. and Feyen, J. (1996): Comparison of three methods to calibrate TDR for monitoring solute movement in unsaturated soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 60: 747–754.

Miyamoto, T., Kameyama, K. and Shinogi, Y. (2010): Electrical conductivity and nitrate concentrations in an Andisol field using time domain reflectometry. Proceedings of 19th World Congress of Soil Science, 54–57.

Muñoz-Carpena, R., Regalado, C.M., Ritter, A., Alvarez-Benedi, J. and Socorro, A.R. (2005): TDR estimation of electrical conductivity and saline solute concentration in a volcanic soil. Geoderma, 124: 399–413.

Nadler, A. and Frenkel, H. (1980): Determination of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity measurements by four-electrode method. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 1216–1221.

登尾浩助 (2003): 実践 TDR 法活用—土壌中の水分・塩分量の同時測定—. 土壌の物理性, 93: 57–65.

Porter, L.K., Kemper, W.D., Jackson, R.D. and Stewart, B.A. (1960): Chloride diffusion in soils as influenced by moisture content. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 24: 460–463.

Richards, L.A. (1966): A soil salinity sensor of improved design. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 30: 333–337.

Rhoades, J.D. (1992): Instrumental field methods of salinity appraisal. In Topp, G.C., Reynolds W.D. and Green, R.E. (ed.) Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice. pp. 231–248, SSSA Special Publication No. 30, Madison.

Rhoades, J.D. (1999): Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. p.150, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Rhoades, J.D. and Ingvalson, R.D. (1971): Determining salinity in field soils with soil resistance measurements. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 35: 54–60.

Rhoades, J.D., Raats, P.A. and Prather, R.J. (1976): Effects of liquid–phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., 40: 651–655.

Rhoades, J.D., Kaddah, M.T., Halvorson, A.D. and Prather, R.J. (1977): Establishing soil electrical conductivity–salinity calibrations using four–electrode cells containing undisturbed soil cores. Soil Sci. 123: 137–141.

Rhoades, J.D., Manteghi, N.A., Shouse, P.J. and Alves, W.J. (1989): Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. Soil Sci. Soc. Am. J., 53: 433–439.

Risler, P.D., Wraith, J.M. and Gaber, H.M. (1996): Solute transport under transient flow conditions estimated using time domain reflectometry. Soil Sci. Soc. Am. J., 60: 1297–1305.

Shinberg, I., Rhoades, J.D. and Prather, R.J. (1980): Effect of exchangeable sodium percentage, cation exchange capacity, and soil solution concentration on soil electrical conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 469–473.

植松慎一郎, 長谷川周一, 宮﨑　毅, 西村　拓 (2012): 黒ボク土畑表層のバイパス流の定量化. 2011 土壌水分ワークショップ論文集, 64–71.

Ward, A.L., Kachanoski, R.G. and Elrick, D.E. (1994): Laboratory measurements of solute transport using time domain reflectometry. Soil Sci. Soc. Am. J., 58: 1031–1039.

要　　旨

近年，TDR などにより，土壌試料中の体積含水率 θ と電気伝導率 EC を同時に測れるようになった．ここで測定される土壌の EC_a は，土壌溶液の EC_w と θ に大きく依存する．本稿では，4 極法による土壌の EC_a 測定に対して，EC_a–θ–EC_w 関係を築いた Rhoades et al.（1976）を取り上げ，モデルが導出された経過を再確認し，現在までの関連する議論を概観した．Rhoades モデルは，土壌の液相と固相が並列の電気抵抗を形成していると仮定し，土壌溶液の塩濃度と水分量に依存しない固相の電気伝導率 EC_s と θ に比例する透過係数 T を導入して導出された．さらに，Rhoades らは，4 種類の不攪乱土壌試料を用いた細心の注意を払った丹念な実験によりモデルの検証も行った．4 極法による当時の EC 測定では θ の同時測定は困難であったが，TDR など普及した今日において，更にその重要性が増した論文である．

キーワード：Rhoades モデル，塩類土壌，4 極法，Time Domain Reflectometry，溶質移動

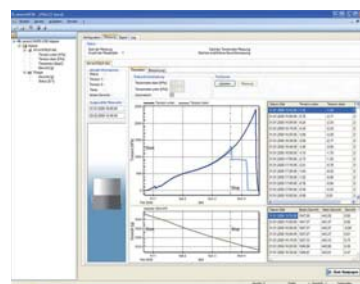
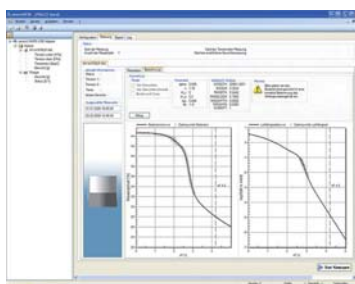
umwelt-monitoring-systeme **measure to know**

HYPROP 水分特性曲線・不飽和透水係数測定装置

HYPROPは蒸発法で試料中の２点のサクションを計測して水分特性曲線と不飽和透水係数を決定する装置です．サンプリングした試料をセンサーヘッドにはめ込み，天秤に載せてPCと接続すれば数日間で水分特性曲線と不飽和透水係数が求められます．

■ 技術仕様

測定範囲	20 ～– 1200 hPa/– 2500 hPa
分 解 能	0.01 hPa
精　　度	1.5 hPa (0～800 hPa)
電子天秤	0 ～2.2 kg
分 解 能	0.01 g
精　　度	0.1 g

● データ解析ソフトHYPROP Fitが付属しています．

T5,T5x テンシオメータ

T5テンシオメータのセラミックチップの直径は5mm，表面積は0.5m²です．土壌の撹乱を最小限に抑えるため微小領域の測定に適してます．

■ 技術仕様

測定範囲	+100 ～– 85 kPa (T5x: ～– 200 kPa)
出力信号	+100 ～– 85 mV
精　　度	± 0.5 kPa
供給電圧	10.6 VDC/ 1.3 mA

KSAT 飽和透水係数測定装置

KSATは低水位法および変水位方で250cm³土壌サンプル（HYPROP兼用）の飽和透水係数を測定する装置です．

- 透水係数の測定範囲は10000cm/dから0.1cm/d
- 完全自動測定
- GUIソフトウェアKSAT VIEW1.0がデータの可視化と飽和透水係数を迅速に計算
- リアルタイムでデータの可視化，評価と保存が可能
- 水の粘性の温度依存性を考慮して基準温度のKsに再計算

アイネクス株式会社(日本総代理店)
〒144-0035　東京都大田区南蒲田2-16-1
NOFテクノポートカマタセンタービル
TEL：03-5713-0388　　FAX：03-5713-1388
Web site：www.ai-nex.co.jp

J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 125, p.43～51 (2013)

2013 年度土壌物理学会大会講演会 ポスターセッション　発表要旨

平成 25 年 10 月 26 日，第 55 回土壌物理学会大会が福島大学キャンパスにおいて開催され，約 120 名が参集した．ポスターセッションは，シンポジウムテーマに沿った「放射線物質と土壌物理」に対して 12 課題，例年通りの「土壌物理研究の最前線」に対して 38 課題，合わせて 50 課題の発表が行われ、熱心な討論が行われた．ポスターセッション発表要旨の概要を資料としてここに掲載する．なお，発表要旨の全容は学会ホームページ上で閲覧可能である．

1. 放射性物質と土壌物理

土壌中における放射能濃度鉛直分布測定器の開発

鈴木心也 [1], 岩瀬　広 [2], 登尾浩助 [3],
溝口　勝 [1], 小林大樹 [1], 伊藤　哲 [4]
[1] 東京大学大学院農学生命科学研究科
[2] 高エネルギー加速器研究機構
[3] 明治大学農学部
[4] 株式会社クロスアビリティ

農地土壌において深度別の放射性セシウム濃度を測定するニーズが高まっている．しかし，現状では現場で土壌採取を行い，持ち帰った後に分析を行うために時間と労力がかかってしまい，非効率的である．そこで，本研究では現場で簡易的に深度別の放射性セシウム濃度が測定可能な機器の開発を行った．開発した測定器は補正を加えることにより，深度別の放射性セシウム濃度を捉えることができた．

キーワード：放射性セシウム, 鉛直濃度分布, フォトダイオード, 簡易測定, 除染

堆積有機質層充填カラムから流出するコロイド粒子の流出特性と粒径分布

山下祐司
筑波大学生命環境系

茨城県南部の林地から採取された堆積有機質層（O 層）を充填したカラム通水実験を行い，コロイドの流出パターンと粒子群の粒径分布を計測した．その結果，ファーストフラッシュ時にコロイド流出量が高まり，その放出速度も速いことが示された．加えて，動的光散乱法による粒径分布測定から，10, 30, 300 nm および 2 μm にピークをもつコロイド粒子群の存在が確認された．

キーワード：コロイド粒子, カラム試験, 動的光散乱粒径分布

農地土壌における放射性セシウムの鉛直分布の空間変動

山野泰明, 吉田修一郎, 塩沢　昌
東京大学大学院農学生命科学研究科

放射性 Cs により汚染された福島県内の未耕起の水田（30 m×110 m）において，5 cm 径サンプラーにより長・短辺方向に 1～2 m 間隔で作土を採取し，放射性 Cs の鉛直分布を測定した．10 cm 層平均 Cs 濃度と平均移動深度の変動係数は，それぞれ 50 %，35 % であった．これらの変動には数十センチスケールの微地形による影響が認められたが，数メートルから数十メートルスケールでの濃度の高低傾向は認められず，ほ場内ではランダムに分布しているとみなせた．

キーワード：除染, 放射性セシウム, 空間変動, 鉛直分布

森林源流部での渓流水を通じた出水時の懸濁物質および放射性セシウムの流出

篠宮佳樹 [1], 小林政広 [2], 小野賢二 [1], 志知幸治 [2],
玉井幸治 [2], 大貫晴浩 [2], 清水貴範 [2], 飯田真一 [2],
延廣竜彦 [3], 澤野真治 [2], 坪山良夫 [2], 蛭田利秀 [4]
[1] 独立行政法人森林総合研究所東北支所
[2] 独立行政法人森林総合研究所
[3] 独立行政法人森林総合研究所北海道支所
[4] 福島県林業研究センター

福島県郡山市の多田野試験林において出水時に渓流水を通じて流出する懸濁物質（SS）や放射性セシウム（Cs）の動態について調査し，以下の結果を得た．1）放射性 Cs は大きな出水でより多く流出する，2）単位面積あたりの森林の放射性 Cs 流出率は小さい，3）出水時の渓流水の SS は有機態成分より無機態成分のほうが多くなる，4）出水時の SS に含まれる放射性 Cs は水や酸に溶けにくい形態のものが多い．

キーワード：森林源流部, 放射性セシウム, 渓流水, 懸濁物質, 流出

飯舘村における除染後農地での水稲栽培試験

西脇淳子 [1], 浅木直美 [1], 小松崎将一 [1],
溝口 勝 [2], 登尾浩助 [3]
[1] 茨城大学農学部
[2] 東京大学大学院農学生命科学研究科
[3] 明治大学農学部

福島第一原子力発電所の事故で汚染された農地での農業再開に向け除染活動が行われる．本研究では，表土剥ぎ取り除染にともなう問題点として土壌肥沃度の低下を念頭に，福島県飯舘村での農業を再生させるため，除染後の水田への稲わらの鋤き込み，または堆肥施用が土壌特性に与える影響と水稲生育の調査を行った．その結果，対象区でリン酸が経時低下し，稲の生育が他の区より若干劣ることが確認された．また，稲わらから土壌への Cs 移行はほとんど見られなかった．

キーワード：放射性セシウム, 水稲, 表土剥ぎ取り, 飯舘村

飯舘村再生を目指す協働の成り立ち
—ふくしま再生の会を事例に—

横川華枝, 溝口 勝
東京大学大学院農学生命科学研究科

高濃度の放射能汚染のために全村避難の対象である福島県飯舘村において，NPO 法人「ふくしま再生の会」を介して住民，行政，大学・研究機関，専門家，ボランティアが協働して被災地域再生プロジェクトを実施するという協働の構造が存在する．その構造はふくしま再生の会会員がそれぞれのバックグラウンド，人脈や経験，専門知識を活かしながら，プロジェクトを効果的かつ円滑に進めることによって成り立っている．

キーワード：福島県飯舘村, 協働, 復興・再生, ボランティア, NPO

福島県飯舘村の河川における放射性物質流出の現地観測

大澤和敏 [1], 片山高嗣 [1], 辰野宇大 [1],
田野井慶太朗 [2], 溝口 勝 [2]
[1] 宇都宮大学農学部
[2] 東京大学大学院農学生命科学研究科

福島県飯舘村南部に位置する新田川水系の比曽川を対象として，流域における放射性セシウムの流出量を現地観測によって定量した．2013 年 6 月の一雨における観測の結果，河川水中における SS 濃度と ^{137}Cs 濃度の相関は高く，放射性セシウムは懸濁物質に吸着された状態で輸送されていることが分かった．また，SS 流出量の総量は 3.9 Mg（0.15 g/m^2）であり，^{137}Cs 流出量の総量は 301 MBq（0.012 kBq/m^2）であった．

キーワード：放射性セシウム, 懸濁物質, 流出, モニタリング, 福島

真砂に含まれる雲母様粒子に収着するセシウム分布の SEM-EDX による観察

末継 淳, 森 也寸志
岡山大学大学院環境生命科学研究科

土壌中のイライトやバイオタイト（黒雲母）等の鉱物はセシウム（Cs）を強固に吸着し，表土の除染を困難にするとされる．発表者らは，雲母等に固定されたカリウムを可溶化するカリウム溶解菌を用いて表土中の Cs を可溶化させ，可溶化した Cs を人工マクロポアで土壌深部へ除去する方法を検討している．本発表では，まず粗大な雲母様粒子に Cs が収着するかどうかを確認し，収着した Cs の空間分布を SEM-EDX（走査型電子顕微鏡-エネルギー分散型蛍光 X 線分析）によって明らかにした．

キーワード：雲母様粒子, セシウム, SEM-EDX, 人工マクロポア, カリウム溶解菌

飯舘村水田での代かき除染法の効果を高めるための土粒子の沈降速度

石渡尚之, 溝口 勝
東京大学大学院農学生命科学研究科

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災に伴い福島第一原子力発電所から拡散した放射性物質は主に地表面に存在するといわれる．しかし，草の繁茂，耕耘，イノシシ等の獣害によって実際には表土削り取り除染法を適用しがたい農地が多い．そのため実際の農地で使え，特別な試薬が不要で省労力な除染手法の開発が必要である．本研究では福島県飯舘村水田の除染を念頭に，除染効果を高めるために土の団粒構造の破壊に着目した代かき除染法開発のための基礎実験を行った．

キーワード：放射性セシウム, 水田, 除染, 代かき, 沈降速度

下方浸透促進による地表からの放射性降下物削減の試み

森 也寸志 [1], 宮本珠未 [1], 稲生栄子 [2],
登尾浩助 [3], 末継 淳 [1]
[1] 岡山大学大学院
[2] 宮城県農業・園芸総合研究所
[3] 明治大学農学部

排水不良地では，表面流発生やクラスト形成，また近年増加傾向にある強雨によって表層土壌が失われる劣化プロセスにさらされる可能性が高い．本研究では，東日本大震災の過程で放射性物質の降下があった排水不良の果樹園において，下方浸透促進技術を使って放射性物質を根群域下に移動させ，廃棄土壌を発生させずに地表における放射線量を減ずることを試みた．カラム実験では放射性物質が下方に移動し，かつ排水からは未検出という初期の知見を得た．

キーワード：放射性物質, 浸透, マクロポア

可搬式ガンマカメラと遮蔽土壌リモナイトによる原発事故後の環境 γ 線低減に関する研究

水野義之[1], 服部友紀[2], 上坂りさ[3]
[1] 京都女子大学大学院現代社会研究科
[2] 京都大学大学院農学研究科
[3] 京都女子大学現代社会学部

福島原発事故後の土壌汚染の特徴は，放射性セシウムが広範囲に非一様分布しているため，空間線量率は周辺半径数百メートル全域の放射線影響を考慮しなければならないことである．このため現状では除染効率の改善が容易ではなく，社会的困難に逢着している．そこで本研究では可搬性の高い簡易型ガンマカメラを開発し，γ 線の飛来方向を確認しつつ，リモナイト等遮蔽性土壌を組み合わせた環境 γ 線低減方法を開発したので，その研究成果と実施報告を行う．

キーワード：除染, 原発事故, ガンマカメラ, 遮蔽性土壌, リモナイト

福島県内の立地の異なる水田における放射性 Cs 流入・流出量の推定

吉川省子[1], 江口定夫[1], 板橋　直[1],
井倉将人[1], 大越　聡[2]
[1] 農業環境技術研究所
[2] 福島県農業総合センター

福島原発事故後に，2012 年 5 月から 1 年間，放射性 Cs 濃度の高いコメを産出した 3 水田において，水田の水収支，および水とともに移動する放射性 Cs の測定により，その水田での放射性 Cs 流入・流出量の推定を行った．1 年間の放射性 Cs の出入り（但し水稲収穫分は考慮していない）は，水田の Cs 存在量の 0.6 % の流出，0.3 % の流入，2.3 % の流出と計算された．

キーワード：水収支, 放射性セシウム, 懸濁物質, 水田

2. 土壌物理研究の最前線

干拓地水田の耕盤層に形成された管状孔隙およびリーゼガング帯

成岡　市[1], 廣住豊一[1], 古谷　啓[2]
[1] 三重大学大学院生物資源学研究科
[2] 三重県農林水産部

干拓地水田の管状孔隙構造，層位間の接続性・通気性・排水性等について，現地調査・室内実験から考察した．とくに耕盤層の管状斑鉄は，孔隙辺縁部（斑鉄部分）の密度が大きく，孔隙径の大小に関係なく孔隙の辺縁から 200 ~ 300 μm 基質側に密度のピークがあった．この “Liesegang band” は，土壌の酸化還元，水稲根の酸化力等に関する既往の知見のほか，通気性の高い層位間の粗孔隙構造と地下汽水位の上下動の結果によるものと考察した．

キーワード：管状孔隙, 土壌構造, リーゼガング帯, 水田耕盤層, 干拓地

グラビティーコアラー型新型 TDR プローブを用いた深海底堆積物水分量測定の検討

落合博之[1], 登尾浩助[2], 松本　良[2]
[1] 北里大学
[2] 明治大学

近年, 新エネルギーの開発が求められている. その中の一つのメタンハイドレートが, 固体状の天然ガス資源として注目を浴び始めている. 深海底にはフリーガスとしてメタンガスが存在することが分かり始め, その測定方法が求められている. 落合らは, 海底堆積物中の水分量測定に成功したが, 汎用性が低く, 費用がかかった. そこで本研究ではより汎用性が高く, それまでより安価で測定することを念頭に置いて研究した.

キーワード：水分量, 深海底, TDR, グラビティーコア

豊浦砂の荷電特性

本荘雄太[1], 辻本陽子[1], 小林幹佳[1], 足立泰久[2]
[1] 筑波大学生命環境科学研究科
[2] 筑波大学生命環境系

飽和豊浦砂の流動電位と電気伝導度の測定により，豊浦砂の荷電特性を調べた．電気伝導度を解析した結果，O’Brien らの理論式がよく成り立つこと，表面伝導の影響が無視できることが明らかとなった．流動電位から算出したゼータ電位の pH 依存性は，主成分であるシリカと定性的に一致した．しかし，ゼータ電位の実験値と，Hiemstra らが報告した 1pK Stern モデルによるシリカの拡散層電位の計算値とは定量的に異なることが明らかになった．

キーワード：豊浦砂, ゼータ電位, 表面伝導, 1pK モデル

無塩系粘土粒子の誘電特性に対する電気二重層の影響

辻本陽子[1], Claire Chassagne[2], 足立泰久[3]
[1] 筑波大学大学院生命環境科学研究科
[2] デルフト工科大学
[1] 筑波大学大学院生命環境系

誘電スペクトロスコピーにより無塩系粘土懸濁液の誘電特性を明らかにし，電気二重層の発達やそれに伴う粒子間相互作用の影響を調べた．スターン層導電率およびゼータ電位をパラメーターとして，Chassagne らの理論に基づき解析をした結果，緩和周波数がバルクの導電率に相当するイオン強度によって決まるデバイ長と相関があることが明らかとなった．また，誘電率と体積分率の関係から，モンモリロナイト粒子間に相互作用が働いていることが示唆された．

キーワード：粘土, 誘電スペクトロスコピー, 分極率, ゼータ電位

Photo. 1　ポスター会場の様子.

鳥取マサ土の表面流出に及ぼす降水の pH と電解質の影響

山田健太[1], 小林幹佳[2], 藤巻晴行[3]
[1] 筑波大学大学院生命環境科学研究科
[2] 筑波大学生命環境系
[3] 鳥取大学乾燥地研究センター

本研究では，小型人工降雨装置を作成し，降水の pH, 電解質の種類が土壌表面からの流出水の発生に及ぼす影響について検討した．実験から，表面流出の発生は酸性で抑制され，アルカリ性で促進されることが明らかとなった．これは土粒子の ζ 電位の大きさに対応していた．また，土粒子間の静電的反発力のない急速凝集領域にある 1 M NaCl，1 mM $CaCl_2$ の降水実験の結果，Ca 降水の方が表面流出発生の抑制効果があった．

キーワード：土壌コロイド, クラスト, ゼータ電位, 凝集・分散

水の流れがある土中の凍結過程の観察

渡辺晋生
三重大学大学院生物資源学研究科

砂試料両側端の水位を等しくした水の流れのない条件と，一定の水位差を設けた水の流れのある条件で，試料に鉛直に挿入した冷却管に –20°C の冷媒を循環した．この際，凍土の発達と地下水位の変化を壁面より観察した．流れのない条件では冷媒循環後 90 分で凍土が不透水性の壁状の層をなしたが，流れのある条件では凍土の成長により流れが遮られるまで 330 分を要した．熱の移流や流れによる間隙氷の形や分布の変化が，凍土の成長と透水性の低下を遅くしたと考えられる．

キーワード：凍土, 透水性, 地下水位, その場観察

湛水土壌表面近傍の Eh と DO の空間分布

竹内萌実, 渡辺晋生
三重大学大学院生物資源学研究科

室内実験により湛水土壌の表面近傍の Eh と DO の空間分布を調べた．給水開始後 48 h は, DO に測定箇所による違いはみられなかったが，Eh は給水点からの距離で異なった．48 h 以後は, 給水点からの距離が異なっても, Eh や DO の深さ分布は等しくなった．室内実験では乾燥密度や基質の添加を均等に行い，給水点を考慮すれば, 48 h 以後では Eh の空間分布を無視できるといえる．

キーワード：酸化還元電位, 溶存酸素量, 空間分布, 土壌表面

窒素・炭素循環連結モデルによる土中の有機物分解の検討

三木真隆, 取出伸夫
三重大学大学院生物資源学研究科

植物遺体の分解実験（広瀬 1973）に対して窒素・炭素循環モデルを適用し，一次分解定数や腐植の生成割合を決定し，有機物分解過程の窒素と炭素の形態を検討した．C/N 比が大きい植物遺体ほど，分解定数が小さい．C/N 比が 20 以上の植物遺体では，分解初期において土から無機化された無機態窒素の有機化が生じた．さらに分解が進行すると，CO_2 の発生により C/N 比は 20 以下に低下し，窒素の無機化が生じる有機物分解過程へと変化し，最終的に NH_4 と腐植に分解された．

キーワード：窒素循環, 有機物分解, C/N 比, 一次分解

凍結・融解過程における黒ボク土の不凍水量曲線

長田友里恵, 渡辺晋生
三重大学大学院生物資源学研究科

黒ボク土を異なる速度で凍結・融解し，不凍水量曲線を比較した．凍結速度が速いと，温度平衡時に比べ不凍水量が多くなった．また，動的に温度を変化させながら不凍水量曲線を作成すると，凍結曲線と融解曲線に氷の非平衡成長による見かけ上のヒステリシスが生じた．水分特性曲線や蒸発過程の水分量変化は不凍水量曲線と概ね一致したが，今後の詳細な検討が必要である．

キーワード：凍結曲線, 融解曲線, 水分特性曲線, 凍結速度, TDR

土壌リアルタイム分析のための EC, 温度, pH センサを集積化したマルチモーダルセンサの開発

二川雅登[1], 村田光明[2], 石田　誠[2], 澤田和明[2]
[1] 豊橋技術科学大学テーラーメイド・バトンゾーン教育推進本部
[2] 豊橋技術科学大学電子情報工学専攻

土壌中のオンサイトモニタリングを目指し，EC，温度，pH センサを集積化したマルチモーダルセンサを製作した．5 mm 角の Si チップ上に半導体集積回路技術を用いて形成しており，各センサが同時・リアルタイムに計測できることが特徴となっている．このセンサを用い，ロックウールでの EC，温度，pH リアルタイム計測と，土壌での EC，温度の長期計測を行い，センサの有効性を確認することができた．

キーワード：EC センサ, pH センサ, 温度センサ, 半導体集積回路, リアルタイム測定

mm スケール EC センサアレイシステムを用いた肥料拡散係数の算出

村田光明[1], 二川雅登[2], 熊崎　忠[3],
石田　誠[1], 三枝正彦[3], 澤田和明[1]
[1] 豊橋技術科学大学電子情報工学専攻
[2] 豊橋技術科学大学テーラーメイド · バトンゾーン教育推進本部
[3] 豊橋技術科学大学先端農業バイオリサーチセンター

土壌の養分拡散は作物の養分吸収を知るためにとても重要である．拡散の大きさを示す指標として拡散係数がある．拡散係数の算出は 2 cm 以下の養分分布変化を測定する必要がある．しかし，土壌を採取する方法が主流のため，非破壊，連続測定が困難である．本研究では，mm スケールの電気伝導度（EC）センサを複数利用した EC センサアレイシステム（ECSAS）を作製した．ECSAS を用いて土壌溶液 EC 分布を連続測定した結果と，フィックの法則から算出した EC 分布を比較し，2 種類の土壌の拡散係数を求めた．

キーワード：拡散係数, 電気伝導度, センサアレイ, 連続測定

熱パルスセンサーを用いた飽和 · 不飽和水分フラックスの推定

坂井　勝, 古田侑資, 近藤菜穂
三重大学生物資源学部

鳥取砂丘砂と黒ボク土に 5 線式熱パルスセンサーを適用し，飽和定常流 · 不飽和重力流実験中の水分フラックスの推定を行なった．飽和流については精度よく推定でき，地下水流速測定への適用が期待される．不飽和流については，水分減少時に生じる気相 · 液相のバラつきが原因と考えられるズレが見られた．

キーワード：土中水分フラックス, 熱特性, 5 線熱パルスセンサー, 飽和 · 不飽和流

水田水地温の年々変動と水地温上昇処理が水稲の乾物生産に与える影響 —６年間の圃場試験結果—

臼井靖浩, 福岡峰彦, 吉本真由美, 常田岳志,
酒井英光, 長谷川利拡
独立行政法人農業環境技術研究所

水地温上昇処理が水地温の変動と水稲の乾物生産に与える影響を圃場条件で長期的に確かめるとともに，品種や他の環境要因との相互作用を検討した．水地温上昇処理により水稲の乾物重は有意に増加（$p<0.05$）した．温度条件の変化（水地温上昇処理）が作物の生育に影響を及ぼすことが圃場条件での実験によって明らかになった．また年次の水地温変動と気温変動についても検討した．

キーワード：水地温上昇処理, 水地温年次変動, 温度条件, 乾物生産, 品種 · 年次間差

微小重力下における土壌粒子モデル間隙中の水分移動

名倉理紗[1], 佐藤直人[2], 南　隼人[2],
片野健太郎[1], 登尾浩助[1]
[1] 明治大学大学院農学研究科
[2] 明治大学農学部

微小重力下で作物を育てる宇宙農業は，長期間 · 多人数の宇宙開発ミッションを行うために重要である．宇宙空間で土耕栽培を行うには，微小重力下における土壌粒子間隙中の水分移動のメカニズムを明らかにすることが必要である．そこで，本研究ではガラス製丸底フラスコを用いて土壌粒子モデルを作成し，モデル間隙中の水分移動を可視化し画像解析した．水分は丸底フラスコ接触点に液架橋のような形状で保持され，移動することはなかった．

キーワード：微小重力, 土壌粒子間隙, 水分移動

インディカ種水稲 IR24 の栽培における水管理の違いが土壌溶液中 NH_4^+ · NO_3^- 濃度と SPAD 値に及ぼす影響

下大園直人[1], 南　隼人[2], 島野光隆[2], 登尾浩助[2]
[1] 明治大学大学院農学研究科
[2] 明治大学農学部

水田において異なる水管理が，土壌溶液中の NH_4^+ · NO_3^- 濃度と SPAD 値に及ぼす影響を調査した．その結果，調査期間中における土壌溶液中 NH_4^+ は，湛水区では移植後 45 日目まで，間断灌漑区では 17 日目まで存在することがわかった．また，土壌溶液中 NO_3^- は，湛水区では移植後 10 日目まで，間断灌漑区では 34 日目まで存在することがわかった．栽培した IR24 の SPAD 値は，移植後 32 日目以降，湛水区が間断灌漑を行った 2 つの区画に比べ高い値で推移した．

キーワード：間断灌漑, アンモニア態窒素, 硝酸態窒素, SPAD 値

可変抵抗式水位計を用いた低コスト自動計測型負圧浸入計の開発

山崎琢平, 井本博美, 西村　拓
東京大学大学院農学生命科学研究科

負圧浸入計を用いた測定は通常不飽和状態にある土壌において非湛水条件下の透水性を評価する手法として検討が続けられている．本研究では，計測の省力化を目的に可変抵抗式水位計と圧力変換器を用いた自動計測型負圧浸入計の開発を試みた．計測精度は概ね良好で，可変抵抗式水位計の有効性が確認された．自動計測化に関する部分が 5.4 万円の比較的安価な装置を開発できた．

キーワード：負圧浸入計, 自動計

飽和透水係数が野良イモの死滅率に与える影響

岩田幸良[1], 広田知良[1], 矢崎友嗣[2], 岩崎暁生[3],
鈴木 剛[3], 井上 聡[1], 臼木一英[1]
[1] 農業・食品総合技術研究機構
[2] 湿原研究所
[3] 北海道総合研究機構

気候変動により，北海道の大規模畑作体系においてもっとも厄介な雑草の一つとなった野良イモについて，北海道十勝地域の 4 地区で 2 年間観測した野良イモの生存率と各圃場の飽和透水係数との関係を調べた．冬の低温により凍結死した圃場や表層の透水性以外の要因で排水不良の圃場を除くと，両者の間に有意な関係が認められた．インキュベーション試験の結果から，過湿による野良イモの死滅は，融雪期より後の暖候期の多雨後に生じたことが示唆された．

キーワード：表層土壌の透水性, 降雨, 湿害, 融雪水の浸透, 発芽

農地土壌水分の広域予測に向けた不飽和水分移動特性の推定法の検討

加藤千尋, 林 祐誠, 西村 拓
東京大学大学院

土壌データベースを利用した農地土壌水分の広域予測を想定し，富山市吉岡（Sandy Loam），福井市下中（Clay Loam）の二種類の土壌について，水分移動特性の推定法を検討した．単純な作物根系を仮定すると，土壌水分予測精度が増すこと，不飽和透水係数を特徴付けるパラメータ（間隙結合係数 ℓ）の，土壌水分量予測値に対する感度が低くなることが示唆された．

キーワード：不飽和水分移動特性, 土壌水分予測, 間隙結合係数, 根の吸水

TDT による砂のバルク EC 計測

平嶋雄太[1], 上村将彰[2], 宮本英揮[1]
[1] 佐賀大学農学部
[2] 佐賀大学大学院農学研究科

TDT センサーによる高精度の電気伝導度（EC）計測を実現するために，濃度の異なる NaCl 溶液と混合した水分飽和砂の TDT 波形を取得・解析し，その測定値を 4 極センサーのそれと比較した．波形の勾配は，NaCl 溶液の電気伝導度（α_w）の増加とともに緩やかになり，波形の立ち上がり点の時間は α_w によらず概ね同一値を示した．波形最大勾配値（S_{Max}）が 580 mV ns^{-1} を超える低 EC 条件では α_{TDT} はゼロを示し，良好な精度で EC を決定することができなかった．S_{Max} と 4 極センサーで測定した EC 値（α_{4probe}）．

キーワード：TDT, バルク電気伝導度, 最大勾配（S_{Max}）

バイオチャー混入土壌における熱水土壌消毒時の熱および水分移動

伊東雄樹[1], 鈴木文也[1], 児玉康夫[2], 登尾浩助[2]
[1] 明治大学大学院
[2] 明治大学

熱水土壌消毒による温室効果ガス放出量削減を目的としたバイオチャーの土壌混入が，熱水処理時の地温変化や透水性に影響を及ぼすか検討した．バイオチャー混入土壌における熱水土壌消毒時の熱移動はわずかに妨げられるが，水分移動にはほとんど影響がないことが明らかになった．したがって，バイオチャー混入土壌においても熱水土壌消毒は実施可能だと考えられる．

キーワード：熱水土壌消毒, 温室効果ガス, バイオチャー, 熱移動, 水分移動

ビート栽培カラムにおける土壌水分・塩分の鉛直分布特性

田川堅太[1], 高橋翔平[2], 永野一輝[2],
長 裕幸[2], 北野雅治[3]
[1] 鹿児島大学大学院連合農学研究科
[2] 佐賀大学農学部
[3] 九州大学大学院農学研究院

地表面から深さ 0.6 m に地下水面を固定した土壌カラムにおいて，ビートを栽培し，植物体・土層中へのイオンの集積量を調べた．ビートの栽培により，深さ 0.05 m の付近でイオンの集積が最大となった．トウモロコシとの比較により，Na^+, Ca^{2+} に対する顕著な除塩効果が認められた．

キーワード：塩類集積, バイオレメディエーション, ビート

粘土スラリーの含水比・EC・間隙比の同時計測に対する TDT の適用

上村将彰[1], Ty P.A. Ferré[2], Markus Tuller[2], 宮本英揮[1]
[1] 佐賀大学大学院農学研究科
[2] University of Arizona

粘土の含水比（w）・バルク電気伝導度（σ_{TDT}）・間隙比（e）の同時計測法を確立するために，SDI-12 型 TDT センサーを用いて w の異なるカオリナイトスラリーの TDT 波形を取得・解析し，w と見かけの誘電率（ε_{TDT}）および σ_{TDT} との関係を調べた．w の増加とともに ε_{TDT} は曲線的に増加し，逆に σ_{TDT} は低下した．ε_{TDT} と w との経験的関係に基づいて算出した ε は，ε_{TDT} の増加とともに増加した．波形勾配値（S_{max}）と σ_{TDT} との間にも応答関係が成立する可能性が示唆されたことから，その関係を定式化することができれば，水分飽和条件のカオリナイトスラリーの w, σ_{TDT}, および e の同時計測法として，TDT は有望であると考えられた．

キーワード：時間領域透過法（TDT）, 粘土スラリー, 含水比, 間隙比

TDT による重粘土水田の含水比 · 間隙比のモニタリング

上村将彰 [1], 宮本英揮 [2]
[1] 佐賀大学大学院農学研究科
[2] 佐賀大学農学部

重粘土 SRI 水田の含水比（w）· 間隙比（e）の変動を観察するために，TDT センサーを用いて水田土壌の見かけの誘電率（ε_{TDT}）を連続測定した．水稲生育初期には，湛水や降雨によらず w と e が漸減し続ける，不可逆的な土壌の乾燥 · 収縮が確認された．サンプリングエリア内に亀裂が形成されると，ε_{TDT} 値は局所的な乾湿によって大きく増減するため，湛水の判断指標として ε_{TDT} 値を用いる場合，埋設場所の違いによるセンサー出力の差異を考慮する必要がある．

キーワード：重粘土, 含水比, 間隙比, モニタリング

鉱山由来の重金属による中山間地の土壌汚染に関する研究

服部拓生 [1], 西村直正 [2]
[1] 岐阜大学大学院応用生物科学研究科
[2] 岐阜大学応用生物科学部

今日までに日本全国で 63 箇所の地域において，農地土壌のカドミウム（Cd）汚染対策が実施された．また銅（Cu）は 11 箇所の地域で汚染対策が実施されている．本研究では，これらの内で Cd と Cu の両重金属が採掘されていた鉱山から土壌汚染が生じた地域周辺において，現在における汚染状況と汚染経路について土壌調査を行った．その結果，汚染源と思われる鉱山跡地においては Cd, Cu 共に高い値が認められ，可溶性 Cd 含有量に関しては対策地域周辺やそれ以遠の範囲においても本研究で基準の目安とした 0.2 mg/kg を超えている地点があった．しかし汚染源から離れると共に重金属含有量が低くなる傾向があることもわかった．汚染源より 5 km 以遠はほとんど土壌汚染が認められなかった．また数カ所の地点においては，地中深さ 50 cm まで鉛直方向への汚染の広がりを調査した．その結果，特に汚染源付近では，Cd は深くなるごとに濃度が高くなり，Cu は逆に低くなる傾向が見られた．そのため Cd は地下水への溶出による二次汚染拡大に対する注意が必要と推察される．

キーワード：土壌汚染, 重金属, カドミウム, 銅, 非農地

不攪乱土における動水勾配の変化に伴う飽和透水係数の変動特性とその原因

田邉幸大 [1], 西村直正 [2]
[1] 岐阜大学大学院応用生物科学研究科
[2] 岐阜大学応用生物科学部

前報では，脱気飽和および毛管飽和処理した不攪乱土試料において，動水勾配の変化に伴う有効応力と間隙水圧の変化により k_s がおおよそ低下する結果が得られていた．本研究では別の場所から採取した不攪乱土を用いて同様の実験を行った．その結果，脱気飽和試料では k_s の変化はあまり生じず，毛管飽和試料では k_s が上昇する前報とは異なる k_s の変動を示した．これは粒径や団粒構造などの土壌特性の違いが k_s の変動の特性に影響を及ぼしていると推察された．

キーワード：飽和透水係数, 動水勾配, 有効応力, 間隙水圧, 不攪乱土

転作樹園地における掛け流し灌漑による土壌環境の変化

加藤　幸 [1], 伊東竜太 [2], 溝口　勝 [3]
[1] 弘前大学農学生命科学部
[2] 岩木山の見えるぶどう園
[3] 東京大学大学院農学生命科学研究科

青森県弘前市周辺では 2013 年の春, 極端な少雨傾向となった．ぶどう園（スチューベン）では開花直前にもっとも水分を消費する．そのため，通常，湛水を行うことが少ない樹園地でも灌漑の必要が生じた．これに対し農家からは，湛水の時期やその量について戸惑いの声が聞かれた．本研究では，水田から転作したぶどう園において土壌センサを活用し，開花期前後における灌漑実施時の土壌環境の変化をモニタリングした．この結果をもとに，樹園地における灌漑方法について検討した結果を報告する．

キーワード：転作樹園地, 掛け流し灌漑, モニタリング

熱水土壌消毒時の温室効果ガス動態

鈴木文也 [1] 伊東雄樹 [1], 児玉康夫 [2], 登尾浩助 [2]
[1] 明治大学大学院農学研究科
[2] 明治大学農学部

熱水土壌消毒時に大量の温室効果ガスが発生することが報告されている．熱水土壌消毒の施行翌日に CO_2 · N_2O · CH_4 フラックスは最大になり，その後ガスフラックスは徐々に減少した．しかし，熱水土壌消毒開始時から翌日までの経時的なガスフラックスは測定されていない．本研究ではカラム実験で熱水土壌消毒を再現し，熱水土壌消毒開始時から 24 時間後まで 2 時間毎にガスフラックスを測定した．土中の地温 · 水分量などを測定し，熱水土壌消毒時のガス動態について考察した．

キーワード：熱水土壌消毒, 温室効果ガス

毛管力の変化が水平浸潤に及ぼす影響

佐藤直人 [1], 登尾浩助 [2]
[1] 明治大学大学院農学研究科
[2] 明治大学農学部

微小重力下における多孔質体中の水分移動のメカニズムを明らかにするため，表面張力の変化が水平浸潤速度に与える影響を評価した．表面張力の低下により毛管力が小さくなるため，浸潤速度が低下することが示された．

キーワード：微小重力, 表面張力, 水平浸潤, 不飽和透水係数

乾土効果が灰色低地土の CO_2 · CH_4 · N_2O ガス挙動に与える影響

土井俊弘[1], 西脇淳子[2]
[1] 茨城大学農学研究科
[2] 茨城大学農学部

中干しによって乾燥した水田土壌では，乾土効果による N_2O 放出量の増大が懸念される．土壌の物理性と降雨は土壌中のガス移動に影響を及ぼす．本研究では灰色低地土を対象とし，乾燥した水田土壌での CO_2，CH_4 および N_2O ガス挙動に間隙率や降雨強度が与える影響を明らかにすることを目的とした．室内カラム実験を行い，給水直後の CO_2 ガスフラックス値の減少および給水後の CH_4，N_2O ガスの土壌中への吸収を確認した．

キーワード：温室効果ガス, ガスフラックス, 乾土効果, 間隙率

レタス畑からの表面流出および流出土壌に関する映像と観測

坂西研二[1], 芝山道郎[2], 矢口直輝[3]
[1] 農業環境技術研究所
[2] 鹿児島大学農学部
[3] 長野県野菜花き試験場

本調査は全面ビニールマルチのレタス栽培における畝間土壌の移動現象を映像と流出観測で示したものである．ビニールマルチの畝間から雨水が急激に出る様子を捉えた．流出量の観測では当初の設計斜面長より，4倍ほど長くしたため，すぐに貯留桝が満杯になったが，その後の雨水流出の詳細な動きは映像に頼ることとなった．

キーワード：インターバル撮影, 土壌流出, レタス畑, 降雨, 栄養塩

乾燥地塩類集積土壌における耐塩性作物栽培による除塩

高橋翔平[1], 木下佳美[1], 長　裕幸[1],
御領原雄太[1], 北野雅治[2]
[1] 佐賀大学大学院
[2] 九州大学大学院農学研究院

中国・黄河の中流域に存在する圃場において，ビートの栽培を実施した．観測期間中，体積含水率，バルク電気伝導度ともに高い値を示し，現地では塩類集積が進行していると考えられる．ビートへのイオン集積量を調べた結果，Na^+ に対する顕著な除塩効果が認められた．

キーワード：乾燥地, 塩類集積, バイオレメディエーション

HYDRUS-1D と MODFLOW を用いた広域地下水流動解析 — 石川県手取川扇状地の事例 —

岩崎有美[1], 中村公人[2], 堀野治彦[2], 川島茂人[1]
[1] 京都大学大学院農学研究科
[2] 大阪府立大学大学院生命環境科学研究科

石川県手取川扇状地（面積約 140 km^2）を対象として，不飽和浸透流解析が可能である HYDRUS-1D 及び飽和地下水流動解析を行う MODFLOW を用いて，転作田を含む水田地帯における飽和・不飽和帯での浸透過程を考慮した非定常地下水流動解析を行った．その結果，灌漑期前後の地下水位上昇と低下といった水田灌漑を反映した地下水位の季節変動の傾向が再現された．本計算手法が広域の水田地帯での地下水流動解析への適用可能性を示すことができた．

キーワード：地下水, 不飽和浸透流, 水田, 転作田, 扇状地

花崗岩風化土の近飽和透水係数

中野恵子[1], 久保寺秀夫[1,2], 餅田利之[3], 藤本順子[4],
道上伸宏[4], 内山知二[5], 佐野修司[5], 草場　敬[1],
[1] 九州沖縄農業研究センター
[2] 中央農業総合研究センター
[3] 鹿児島県農業開発総合センター
[4] 島根県農業技術センター
[5] 大阪府立環境農林水産総合研究所

排水不良化が指摘されている花崗岩風化土圃場において，硬度分布および耕盤の透水性を調べた．下層の硬度は高く，金属円筒による不撹乱試料採取は困難な場合があった．負圧浸入計を用いて原位置での近飽和透水係数を測定したところ，いずれの圃場も設定圧 = 0 cm の場合には，$10^{-4} \sim 10^{-3}$ cm/s であったが，測定位置によっては，負圧により測定不能な範囲にまで値が低下する場合があった．この低下の程度は，同じ圧力範囲の水分特性曲線からは判定し難かった．

キーワード：排水不良, 負圧浸入計, 水分特性曲線, 硬度, 耕盤

エントロピー最大法を用いた新しい浸潤方程式

筒井　亮[1], 清澤秀樹[2]
[1] 三重大学生物資源学部
[2] 三重大学生物資源学研究科

浸潤方程式についてはこれまで多くの経験式や理論式が提案されてきた．しかし，それらには実測データをもとに同定する必要があるパラメータが含まれ，しかもそれらは土壌の物理性と直接結びつかないものがほとんどである．本研究ではエントロピー最大法（MEP 法）を用いて，土壌状態から容易に得られるパラメータのみを用いた浸潤式の開発・検討を行った．

キーワード：浸潤方程式, エントロピー最大法, 改良ホートン式,

土壌からの排水にともなって大気から浸入する空気の音響測定

深田耕太郎
島根大学生物資源科学部

排水に伴って大気から土壌に空気が浸入する過程はよく分かっていない．そこで，土壌内での音の反射面の位置に注目し，空気の浸入深さと気相率の関係について調べた．その結果，排水にともない，空気が土壌表層から内部へ浸入し，下方向へ拡大する様子を確認できた．

キーワード：排水過程, 土壌空気, 音響測定

テキサスのカルスト地形における土壌水分量の空間変動性

徳本家康[1], J.L. Heilman[2], K.J. McInnes[2], C.L.S. Morgan[2], R.H. Kamps[2]
[1] 鳥取大学
[2] テキサス A& M 大学

テキサスの中央に位置するカルスト地形では，土壌中に石礫含量の占める割合が高く，土壌保水量の低減や木の根の伸長が抑制される．このような環境生態系の水循環の解明には課題が多く，石礫含量を考慮した土壌水分量の観測や石礫分布による土壌水分量の空間変動性の解明が重要である．本研究では，中性子水分計とガンマー線法を併用して，カルスト地形における土壌水分量の空間変動性の解析を行った．

キーワード：空間変動性, 石礫土壌, 中性子水分計, ガンマー線法

水田における水管理の違いが温室効果ガス直接および間接放出量に及ぼす影響

南　隼人[1], 下大園直人[2], 島野光隆[1], 登尾浩助[1]
[1] 明治大学農学部
[2] 明治大学大学院農学研究科

水田において異なる水管理が CO_2，CH_4 および N_2O ガスの直接および間接放出量について調査した．その結果，間断灌漑では湛水区に比べて CH_4 の放出抑制には効果的であったが，N_2O の非常に大きな発生が確認された．間接放出の割合は湛水区で最大となり，水管理によって間接放出量の割合は異なることが示された．

キーワード：水田, 間断灌漑, 温室効果ガス

土壌炭素・窒素動態予測モデルのための微生物バイオマス C/N 比のパラメタリゼーション

朝田　景, 江口定夫
農業環境技術研究所

土壌微生物バイオマスは陸上生態系における有機物動態の重要な役割を担う．プロセスベースの土壌炭素（C）· 窒素（N）動態予測モデルにおいても，その CN 組成比 $[(C/N)_b]$ は N の無機化 · 有機化に関わる重要な入力値である．本研究では，既往研究をもとに，$(C/N)_b$ が土壌の種類 · 特性や土地利用によってどのような影響を受けるのかを調べ，解析結果をモデルに反映した．一例として，黒ボク土の $(C/N)_b$ がモデルのデフォルト値 10 よりも低いことを考慮すると，長期間有機物資材を連用した畑地の土壌有機物プールは大きくなることを示した．

キーワード：土壌微生物バイオマス, 炭素, 窒素, プロセスベースモデル

J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 125, p.53 ~ 54 (2013)

資　料
Miscellaneous

飯舘村再生を目指す協働の成り立ち
—ふくしま再生の会を事例に—

横川華枝[1]・溝口　勝[1]

高濃度の放射能汚染のために全村避難の対象である福島県飯舘村において，NPO 法人「ふくしま再生の会」を介して住民，行政，大学・研究機関，専門家，ボランティアが協働して被災地域再生プロジェクトを実施するという協働の構造が存在する．その構造はふくしま再生の会会員がそれぞれのバックグラウンド，人脈や経験，専門知識を活かしながら，プロジェクトを効果的かつ円滑に進めることによって成り立っている．福島において，現地で活動をつづける「ふくしま再生の会」は重要な組織である．そこで、本稿をポスターセッション発表要旨より抜粋してここに紹介する．

1. はじめに

2011 年の福島第一原子力発電所事故により放射性物質が飛散した福島県飯舘村は，高濃度の放射能汚染のために全村避難対象である．

そのような状況で 2011 年 6 月，飯舘村佐須において飯舘村住民と研究者を中心とした「ふくしま再生の会」による，住民参加型の復興を試みる取り組みがスタートした．数名のメンバーから始まった彼らの試みは今や住民，行政，大学・研究機関，専門家，ボランティアを巻き込み大きく発展している．本報告では，飯舘村で活動を続ける NPO 法人「ふくしま再生の会」（以下ふくしま再生の会）を取り上げ，住民，行政，大学・研究機関を擁する協働の成り立ちを明らかにする．さらに東京大学大学院農学生命科学研究科（以下東京大学）における職員ボランティア「サークルまでい」とふくしま再生の会の協働を考察する．これらを明らかにすることによって，住民，行政，大学・研究機関，専門家，ボランティアによる協働の現実的な一構造として提案したい．

2. 方法

2.1 ふくしま再生の会

ふくしま再生の会は，2011 年 6 月に福島県飯舘村佐須を拠点として設立した．2013 年 3 月 28 日時点で 222 名を数える会員は，元研究者，現役研究者，飯舘村の住民，元行政関係者等，多様なバックグラウンドをもつ．中心となって活動する会員の一部（Fig. 1）は自らを「アラ古希」（70 歳前後の意）と名乗っていることが示すように，シニアメンバーがグループの核である．主な活動は，空間・土壌放射能測定，放射線・気象・土壌のモニタリング，除染技術の研究開発，産業再生のための新産業の検討等の研究活動である．これらの研究成果はホームページ（http://www. fukushima-saisei.jp）で公開されている．

2.2 調査方法

2012 年 10 月 27–28 日のふくしま再生の会の活動，2012 年のサークルまでいの活動に 3 回にわたり参加した．ふくしま再生の会代表である田尾陽一氏を含む会員に対して自由な対話でインタビューを行った．

3. 結果と考察

3.1 住民，行政，大学・研究機関の協働

ふくしま再生の会が取りまとめるプロジェクトの組織概念図を Fig. 2 に示した．NPO 法人であるふくしま再生の会は，住民，行政，大学・研究機関のそれぞれとつながりを持ち，3 者が協力して円滑に物事を進めるための潤滑油としての役割を果たしている．

Fig. 1　ミーティングの様子.

[1] 東京大学大学院農学生命科学研究科

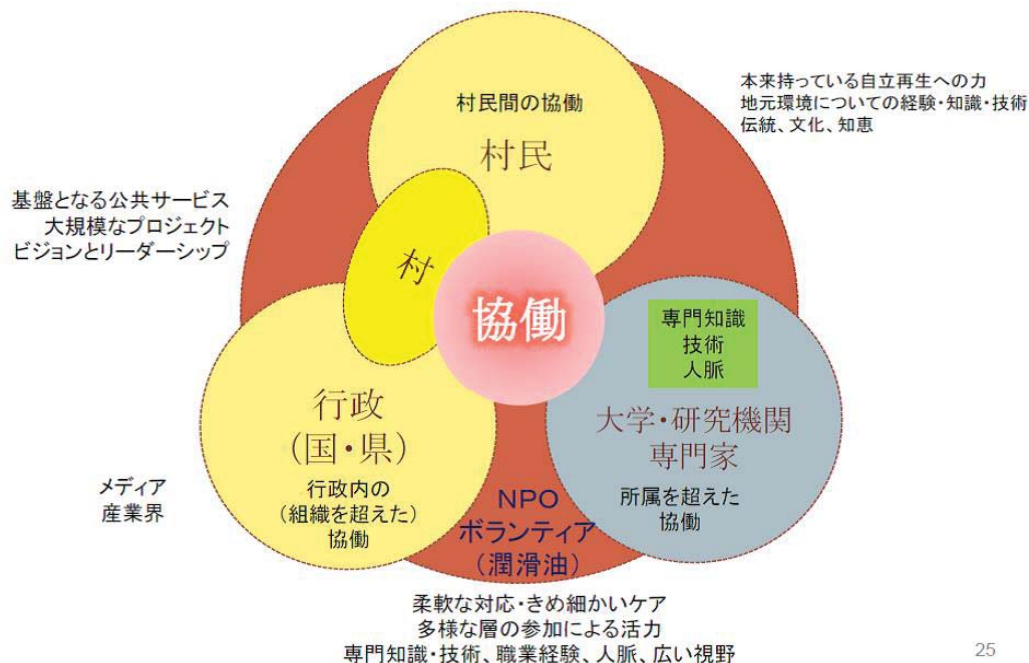



Fig. 2　プロジェクトの組織概念図
(http://www.iai.ga.a.u-tokyo.ac.jp/mizo/edrp/fukushima/saisei/130921/iitate130921.pdf より引用).

たとえば会員の一部は元研究者である．それぞれが築いてきた人脈を活かし，ふくしま再生の会と提携協力先の研究機関をスムーズに結びつけた．この働きによって，たとえば放射性物質を含むサンプルの分析は東京大学や KEK（高エネルギー加速器研究機構）に依頼することができるという体制が整っている（http://www.iai.ga.a.u-tokyo.ac.jp/mizo/lecture/houkoku-1/group-work/2012/G6.pdf）.

また，彼らは豊富な専門知識・技術を提供することによって，住民たちの地域に特化した知恵に基づく，地域に根づいた再生計画のアイデアを後押しする．計画が実現可能であることを示す根拠や検討に必要な情報を補うための研究計画を立案し，大学・研究機関の専門家たちと協働して研究を進める役割を果たしている．

さらに，行政上の手続きや課題への対処に長けた元行政関係者が会員にいるため，そのアドバイスによって，プロジェクトが円滑に進むこともある．

以上のように，ふくしま再生の会は多様な会員のそれぞれのバックグラウンド，人脈や経験，専門知識を活かしながら住民，行政，大学・研究機関 3 者の協働をサポートする．

3.2 東京大学ボランティアとの協働

前述のとおり東京大学はふくしま再生の会からサンプルの分析を依頼されている．実際には農学部 RI 施設が分析を行っているが，その作業は，サンプルを約 600 本の試料びんに詰めるといった時間と手間のかかる作業を含むため，東京大学の職員が立ち上げた「サークルまでい（Fig. 3)」が作業の一部をボランティアで行っている．

サークルまでいは震災復興のために役立ちたいという考えを持つ職員たちから構成されたボランティアグループであり，昼休みや就業後の時間を利用して活動している．このように，ボランティアたちが所属組織を介してふくしま再生の会とつながりをもち，その活動を下支えしているという構造が存在することは，協働構造の裾野の広がりを示す一例として特筆すべきであると考える．

4. おわりに

住民，行政，大学・研究機関，ボランティアは，被災地再生という目的を共有している一方で，それぞれの活動は別々になりがちであり，協働の実現は難しい．しかし，この事例においてはふくしま再生の会を介してつながりを持っている．その協働の心髄は人である．紙面上の契約や協定の裏に，多様なバックグラウンド，経験，人脈をもつ人の存在があってこそ，このような協働が実現するのである．

Fig. 3　サークルまでいポスター.

J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 125, p.55 ~ 57 (2013)

資　料
Miscellaneous

2013 年度土壌物理学会大会　エクスカーションの報告

長田友里恵[1]（参加学生取りまとめ）

2013 年 10 月 26 日 ～ 27 日，福島市に於いて土壌物理学会大会が開催された．本報では，西日本から今回学会に参加した学生により，飯舘村の除染現場に訪れたエクスカーションの模様と感想を報告する．

エクスカーションの行程（27 日）

8:40	福島駅 出発
9:35	飯舘村へ入る
9:45	汚染土壌の仮 · 仮置き場　見学
10:15	飯舘村役場にて休憩
10:45	上比曽地区の森林　見学
12:30	昼食
14:00	ふくしま再生の会　作付試験圃場　見学

エクスカーション当日は，寒さが身に染みるものの，前日までの雨天が信じられないほど気持ちのよい天気となった．福島駅を出発し，飯舘村へと向かった．飯舘村は 2011 年 4 月 22 日に計画的避難区域に指定されて以来，現在もほとんどの地域で居住が制限されている．道中では溝口会長や，「ふくしま再生の会（横川 · 溝口，2013）」理事の菅野宗夫さんから，飯舘村の現状や菅野さん自身の心境などを聞かせていただいた．

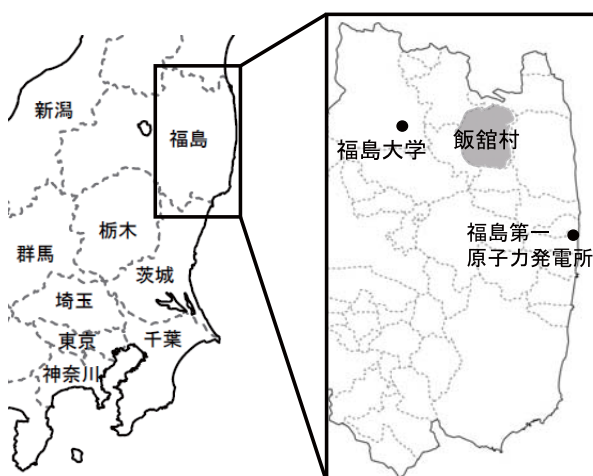



Fig. 1　飯舘村の位置図．

飯舘村へ入り，まず目に入ったのは，至るところに置かれている汚染土壌の詰められたフレコンバッグである．須萱地区にある汚染土壌の仮 · 仮置き場では，想像以上にたくさんのフレコンバッグが積み上げられ，今も行き場が決まっていない状態であった（Photo 1）．

次に，上比曽地区の森林を訪れ，林内雨 · 樹幹流 · 浸透水などの調査の様子を見学した．

昼食では，会場に「ふくしま再生の会」代表の田尾陽一さんが合流し，ふくしま再生の会の組織や活動についてお話しいただいた．ここで GPS と線量計を用いて作成された線量マップを見せていただいた（Photo 2）．データが整えられた見やすいマップであったが，GPS のずれを修正するのに大変時間を要した，とのことだった．

ふくしま再生の会の作付試験圃場に到着するとすぐに，「イネ試験栽培」の文字が見えた（Photo 3）．ここでは，サンプリング土壌や根の線量（Photo 4），大気中の塵を調査しているとのことだった．

飯舘村での滞在中，参加者のうちの 16 名が積算線量計を付けて見学した．その積算線量計の測定結果を図に示す．滞在最終時の積算線量の平均は 4 μSv であった．時間変化では 140 ～ 210 分で大きく変化しており，森林の線量が高かったのではないかと考えられる．

当日，詳しい説明を下さった菅野宗夫さん，田尾陽一さんをはじめとするふくしま再生の会の皆さま，酒井政秋さん，様々な議論を交わして下さった皆さまに，ここに感謝の意を記します．

Photo. 1　仮 · 仮置き場に積まれたフレコンバッグ．

[1] 三重大学大学院生物資源学研究科

Photo. 2　線量マップ.

Photo. 3　ふくしま再生の会 作付試験圃場.

Photo. 4　サンプリングした根（左）と土壌（右）.

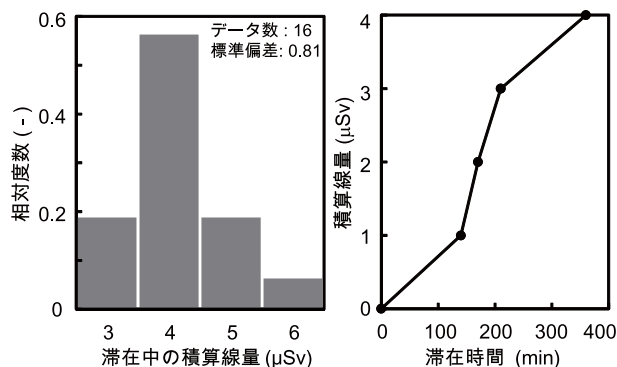



Fig. 2　滞在中の積算線量と線量の時間変化.

参加した学生の感想

今回のエクスカーションに参加するまで，自分が福島のためにできることはせいぜい募金すること程度だと考えていた．なぜなら，被害の規模と深刻さから，「自分ができることはない」と無力感を抱いていたからである．しかし，復興を目指す人々と交流し，お互いを知ることが支援の第一歩だと感じた．何が求められているのかを肌で感じることで，自分たちにできることが何なのか気付けるのだと思う．

佐賀大学 修士 1 年　上田哲大

飯舘村でのエクスカーションでは，原発事故から 2 年経った今でもほとんど進んでいない除染の現状を知った．そのような中，復興に向けてさまざまな活動を行っているふくしま再生の会のみなさんの話を聞いていると，まず，私たちがやるべきことは実際に現地に足を運んで「真実」を見ることであろう．その上で，各々が何をできるか考え，行動し，次の世代に伝えていくことが大切なのではないかと思う．

佐賀大学 修士 1 年　上村将彰

今回，福島での土壌物理学会に参加したことで，多くの刺激を受けた．特に，飯舘村でのエクスカーションでは，除染の現場やふくしま再生の会による試験区の現状を直接見ることができ，住民の方々の声や思いを聴くことができた．正しい見識や技術を持つ人たちが行動し，広めていくことの大切さを改めて認識した．

佐賀大学 学部 3 年　高木恭平

今回のエクスカーションでは，私の一日の積算放射線量は 4 μSv であった．目に見えず，どこにどの程度の量が存在しているのかわかりにくい放射線であるからこそ，ふくしま再生の会の方々が行っていたように，土壌の放射線量などを測定して数値化し，可視化することで，安全性を伝えていくことが復興を進める上で重要なことであると感じた．

佐賀大学 学部 3 年　平嶋雄太

今，日本に住むどれだけの人が，放射線の，現地の，除染の事実を知っているだろうか．私自身もこのエクスカーションが初めて被災地に滞在する機会となった．私たちが飯舘村で目にしたものは，至る所に設置された線量計，閑散とした街並み，除染が未だ 3 ～ 5 % しか終わっていない広大な農地である．菅野宗夫さんの「飯舘に訪れ，現状を知ってほしい」という言葉が日本中に，世界中に伝わり，もう一度日本中が被災地について考えるべきであると感じた．

三重大学 修士 1 年 長田友里恵

大量に積まれた黒色のフレコンバックを見た時，飯舘村が被災地という事を実感した．写真で見た事がある風景なのに，初めて見るような気持ちになった．震災以来，新聞やテレビで放射性物質の汚染について聞かない日は無かった．それが日常化し，いつしか自分の中で汚染問題が他人事の様になっていた．おそらく，多くの人が同じ気持ちだろう．そんな人には，福島に赴き，現地の汚

染現状を自分の目で確かめて欲しいと私は伝えたい．

三重大学 修士 1 年 竹内萌実

ふくしま再生の会の活動を見学して，私はその細やかな測定と膨大なデータ，そして効率的に測定を行うアイデアの多さに驚いた．同会には多様な専門分野から人が集まっており，各々の知識が活動に生かされていた．福島の復興に尽力している会の人たちの姿を見て，私は彼らの生きる力を強く感じた．そして，村の現状や会の活動を伝えることが，飯舘村を見学した者としての最低限の責任であると思った．

三重大学 修士 1 年 三木真隆

10/27 に飯舘村へ見学に行った．汚染土の仮 · 仮置き場や水田でのサンプルを採取する所など見ることができた．ふくしま再生の会の方々による現場の生の声を聴くことができたのはとても貴重な体験だった．この見学会を通して，自分が学んでいる土壌物理学が福島県の復興に貢献しているということを実感することができた．勉学に励み，少しでも福島県の復興につながることをしたいと思った．

三重大学 学部 4 年 岡橋卓朗

飯舘村の田にはセイタカアワダチソウの黄が散見する．2 年以上も放棄していたのだから当然だ．表土剥ぎ取りによる除染は想像以上に進んでいなかった．菅野宗夫氏らの話を伺いそこに暮らす人の，再生の会に携わる人の想いに触れ，これまで被災地に対してぼんやりとイメージしていたものが一掃された感覚だった．百聞は一見に如かず．「もっと現地に寄り添った対応を」．宗夫氏のこの言葉は少なくとも 30 年は心に刻んでおかなければいけないと思った．

三重大学 学部 4 年 釘﨑佑樹

震災から 2 年半がたち，除染や復興ということからやや関心が薄れていたが，今回の学会やエクスカーションを通して，除染の最前線に立つ方々のお話や飯舘村の現場を直接見ることができ，貴重な経験をさせていただいた．また学会では，同年代の発表を聞く機会があり，これからの自分の研究の刺激になった．今後も土壌物理学を一生懸命勉強して，自分もこの学問を盛り上げていこうと感じた．

三重大学 学部 4 年 成毛千尋

引用文献

横川華枝 · 溝口勝（2013）：飯舘村再生を目指す協働の成り立ち—ふくしま再生の会を事例に—. 土壌の物理性, 125: 53–54.

多機能マルチレンジデータロガー ＦＴシリーズ

ＦＴシリーズは、各チャネルに２４ビットΔΣ（デルタシグマ)型Ａ／Ｄコンバータを採用し、全チャネル同時サンプリングによる高精度測定を実現したデータロガーです。
各チャネルは、設定によりアナログ／パルス／接点などに切り替えて使用でき、各種センサを変換器なしにダイレクトに接続できます。
接続可能なセンサは、温度(Pt100／Ｔ型熱電対／Ｋ型熱電対／サーミスタ)、湿度、日射、日照、アルベド、放射収支、気圧、風向風速、雨量、土壌水分、土壌酸素、ＥＣ、ｐＨ、ＰＦ、水位、ひずみなど様々です。

■ＦＴ２(エフティーツー)	■ＦＴＪｒ(エフティージュニア)
標準で８チャネル、最大６４チャネルまで増設可能な多チャネルデータロガーです。 設定により、全てのチャネルをアナログ／パルス／接点などの区別なく利用できるため、全てのチャネルをパルス信号や接点信号の入力チャネルとして使用することもできます。	チャネル数を１チャネルまたは２チャネルとして、低価格を実現したデータロガーです。 １チャネルタイプは、チャネル増設ユニットにより２チャネルタイプへ拡張できます。 標準タイプ以外に、熱電対対応タイプ、制御出力機能付きタイプなどをラインアップしています。

≪ＦＴシリーズ共通の主な特徴≫

- 瞬時値以外に、インターバル間の最大値、最小値、平均値などの統計値を記録
- 平均風速、平均風向、最大瞬間風速、起時など風向風速測定に関わる演算機能を装備
- ひずみセンサ（４ゲージ式、３５０Ωまたは１２０Ω）に対応
- 電圧測定において、０．１μＶの分解能を実現（電圧±７．５ｍＶレンジ時）
- 物理量への換算を目的とした多項式を含む演算式設定機能あり
- プレヒート機能を備えたセンサ電源供給機能装備
- 内蔵メモリへの保存データ数１２５，０００回（保存データ数はチャネル数に影響されない）
- 測定データ回収用としてＵＳＢメモリに対応（ＵＳＢメモリは記録メモリとしても利用可能）
- 回収データはＣＳＶ形式ファイルのため、市販表計算ソフトで直接読み込み可能
- 単三乾電池４本、ＡＣアダプタ、ＵＳＢ給電、外部電源（ＤＣ８～１８Ｖ）に対応
- オプションの通信コンバータを利用することで、ネットワークへの接続も可能

詳しくは当社ホームページでご覧ください。 ＭＣＳ 札幌 で 検索

〒060-0063 札幌市中央区南３条西８丁目７番地４ 遠藤ビル５Ｆ
TEL011-596-0201 FAX011-596-0234
E-mail info@mcs-fs.com URL http://www.mcs-fs.com

J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 125, p.59 ~ 60 (2013)

資　料
Miscellaneous

福島における土壌科学者たちの挑戦
（SSSA 特別セッション第１ラウンド）

溝口　勝 [1] · 登尾浩助 [2] · Clifford Johnston[3]

日本の土壌物理学会のメンバーがアメリカ国際土壌学会（SSSA）の会場を占拠した．登尾浩助 · 溝口　勝 · Clifford Johnston が企画した “Battles of Soil Scientists in Fukushima, Japan” の特別セッションが 2013 年 11 月 4 日，フロリダ州タンパ市で行われた．発表したのは，福島県飯舘村で農業を営む菅野宗夫さんと NPO 法人「ふくしま再生の会」にお世話になっている研究者たち，そして 2011 年 5 月に東京大学で特別セミナー講師をつとめた Johnston 教授である．

2011 年の原発事故に由来する福島の農地における放射性セシウムの除染は日本の土壌物理がリードすべき最大の課題であり，その現状を世界に正しく情報発信する必要がある．こうした状況の時に，2012 年の SSSA に参加した登尾が溝口と相談したのを契機に，粘土表面科学の権威である Johnston 教授の協力を得て，今回のおそらく SSSA 史上日本人初の特別セッションが実現するに至った．

アメリカの研究者の関心もあったためか，幸運にもセッションは月曜日 13 時からのゴールデンアワーに配置された．溝口がはじめに，1）福島の２つの問題（地下水汚染水処理と農地除染）のうち農地除染を扱うこと，2）日本からの正しい情報発信が必要であること，3）村民 · NPO · 研究者の協働研究の中間報告としてこの特別セッションを企画したこと等の開催趣旨を説明した（Photo 1）．その後に合計 9 件の発表（日本: 8 件，アメリカ: 1 件，キャンセル 2 件）があった．キャンセルの時間帯は何もしないのが SSSA 学会の慣例であるが，溝口の機転によりこの時間に「追加情報」を盛り込み，全体の流れをスムーズに進行させた（Table 1）．その効果もあったのか発表における質疑応答も活発で，ピーク時には立見が出るほどの盛況ぶりだった（Photo 2）．特に，現場調査の発表を受けて粘土コロイドへの放射性セシウム固定のメカニズムに関して深い議論が行われた．また，セッション後にカナダの農業系ジャーナルの編集長から特集号を打診されるなど，研究者 · NPO · 住民の協働による研究の進め方にも大きな関心が寄せられた．

Photo 1　スーツとアロハシャツの組み合わせで始まった SSSA 特別セッション．

Photo 2　立見も現れた熱気あふれる会場風景．

[1] 東京大学大学院農学生命科学研究科
[2] 明治大学農学部
[3] Purdue University, Department of Agronomy

Table 1 セッションタイトル：福島における土壌科学者たちの挑戦.
（https://scisoc.confex.com/crops/2013am/webprogram/Session11722.html）

0. はじめに（溝口　勝）
1. 人工マクロポアを用いた鉛直浸透促進による地表面からの放射性降下物の除去（森也寸志）
2. 福島の土壌放射性セシウムの鉛直濃度分布を測定する簡易測定器（鈴木心也）
3. 飯舘村再生を目指す協働の成り立ち —ふくしま再生の会を事例に— （横川華枝）
4. 追加情報-1　飯舘村農地の現状（溝口　勝）
5. 懸濁物質と放射性セシウムの移動のモニタリングと WEPP モデルの適用（大澤和敏）
6. 福島の土壌中のコロイド性放射性セシウムの移動特性（西村拓）
7. 福島の土壌における放射性セシウムの消長と移動を決める粘土鉱物の働き（Cliff Johnston）
8. 追加情報-2　水田湛水による土壌からの放射線量低減効果（溝口　勝）
9. 福島県飯舘村での汚染表土剥ぎ取り後の土壌肥沃度回復（西脇淳子）
10. 福島県飯舘村の水田での放射性セシウム汚染土の埋設実験（溝口　勝）
11. 気温を用いた土壌凍結開始日の推定（登尾浩助）

当日の発表スライドはホームページ（http://www.fukushima-saisei.jp/report201311.html#20131107）から閲覧可能.

欲を言えば土壌物理分野以外の土壌科学分野からの発表がもっとあれば更に良かったかも知れないが，日本の土壌物理学会員が福島の現地実験データに基づいて世界に向けて情報発信できた意義は大きい．やっと土壌物理学の分野でも先進国の仲間入りができたとのいうのが正直な気持ちである．それは文末の Johnston 教授のコメントからも知ることができよう．

最後に，素晴らしい発表をした講演者の皆様に感謝すると同時に，研究の現場を提供し協力していただいた福島県飯舘村農業委員会の菅野宗夫さんとふくしま再生の会の皆様に感謝する．また，これを契機に世界中の土壌科学者が福島の農地に関心を持ち，一緒に問題解決に取り組んでくれることを期待したい．そして，日本人研究者企画の SSSA 特別セッションが今後も継続していくことを切に希望する．

Fig. 1 特別セッションの Web ページ.
https://scisoc.confex.com/crops/2013am/webprogram/Session11722.html

Clifford Johnston (パデュー大学教授) からのコメント

It was a pleasure and honor to participate in the session "Battles of Soil Scientists in Fukushima, Japan". I was very impressed by work that is being done among the soil science community in Japan to address this enormous challenge. The dedication and the novel and practical approaches being used are remarkable. I found the most interesting and inspiring part was the way the different groups of scientists and volunteers have come together, working with local residents. Although this is such a large, complex, and difficult problem, the session in Tampa was a testament to the significant intellectual resources in Japan that are addressing this problem. I hope that there can be continued exchanges between the United States and Japan that would provide an opportunity for our students and scientists to 'see' the different remediation strategies being used and to interact with the various groups involved. As a point of moving forward, I think this session was logical starting point looking at where the contamination exists in the soils of Fukushima and the transport of radioactive Cs in the soil profile. I think that continued linkages with the soil chemistry and soil mineralogy communities would be beneficial. For example, another session in Tampa was focused on K-fixation in soils and the information that was presented in that session has direct relevance to the Cs problem in Fukushima. Thank you for the opportunity to participate in this Session.

J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 125, p.61 ~ 62 (2013)

真っ白なウドの思い出

加藤千尋 [1]

修士課程から現在に至るまで，気候変動が作物生産や自然生態系に及ぼす影響予測や，適応策の検討を念頭に，気候変動下の農地土壌水分・温度分布予測や物質移動予測シミュレーションに取組んできた．研究を進める上では，様々な課題が出てきて苦戦することも多いが，目に見えない地下で，将来どのような現象が生じるかを予測し，それに対する適応策を考えることに面白さを感じている．そのような日々のなかで，ふと，そもそもこの分野に興味を持ったきっかけはどのようなことだったかなと思い，あれこれ思い出してみた．すると，「真っ白なウド」が浮かんできた．

私は，東京郊外のキャンパスで大学学部時代を過した．学部 2 年生から 3 年生にかけて，土壌物理学や農地工学の講義を受講し，食糧生産や自然生態系の基盤となる土壌，あらゆる生命を支える土壌に魅力を感じるようになった．また，普段は目に見えない地下で何が生じているのか，興味をそそられた．

同じ頃，学科の先輩に紹介してもらい，大学の近くの農園でアルバイトを始めた．セイイチさん，フミコさんご夫妻と，ご子息のナオユキさんが今（2013 年）も野菜栽培を続けている．

「うちの畑には穴蔵があるんだよ。何のことかわかるか？」

初めて仕事に行った日，セイイチさんが話しかけてくれた．野菜を作っているという情報だけ聞いて不勉強のまま訪ねた私は，何のことかわからず「穴蔵ですか？」と聞き返してしまった．セイイチさんは，「多摩（地域）の特産物，ウドだよ」と続けた．このときは思いもよらなかったが，この穴蔵は，私にとって土壌物理学，特に土壌中の水・熱移動現象を理解する上でとても良い教材になった．

ウドが日常的に食卓に並ぶ家庭は，全国的には多くないのではないかと思うので，少しウドについて紹介したい．ウドはウコギ科の多年草であり，もともとは林地などの日当たりのよい場所に自生している（野ウド）．ちなみに，「ウドの大木（＝大きいばかりで役にたたない人）」というが，ウドは木本ではなく草本である．野ウドとは別に，完全に日射を遮り育てる真っ白な「白ウド」，畑で盛り土をして半分だけ緑化させる「緑化ウド」がある．このうち白ウドは，現在，東京の多摩地域（特に立川，武蔵野，国分寺，小平など）が生産量全国 1 位である．また，東京の中でも，武蔵野市吉祥寺あたりが最も早く（江戸時代末期）ウドが導入されたといわれている（東京うど物語編集委員会，1997）．私が手伝いにいった農園でも，四季折々の畑作物（キャベツ、ブロッコリー、にんじん、トマト、白菜など）と同時にウドの栽培にも力を入れていた．そのため，アルバイトでは野菜栽培とともにウドの栽培の手伝いも行った．

白ウドの収穫は主に冬であるが，「種（根株）」の状態から収穫まで，8 ヶ月 ～ 1 年程度かかる．春・夏・秋の園芸作物の多くは，栽培期間が 3 ～ 4 ヶ月程度であり，ウドは長い時間をかけて，手間ひまかけて栽培されるのだと驚いた．

まず 3 月ごろ，ウドの種となる根株の株分けを行うところから，ウドの準備が始まる．株分けされた根株は「根株養成」のため，4 月ごろに畑に定植される．順調に育つと，ウドは青々と茂り，10 月ごろには女性の背丈以上，時には 2 m近くに生長する．夏の間に大きく生長した地上部の茎葉から，貯蔵器官である根株に栄養分が送られていく．ウドの収量は，根株の栄養分に左右されるため，この根株養成は重要である．根株での栄養分の蓄積が始まると，根株は一時的に休眠に入る．東京の場合は 10 月上旬に休眠に入り，一定の低温を経過して休眠が終わるのは 1 月上旬である（東京うど物語編集委員会，1997）．休眠の間は容易には萌芽せず，休眠が終わると一定温度の環境下によって萌芽する．萌芽したのち，生長（軟化）させたものが，市場に出回っているウドである．

真っ白なウドは縁起物であり，正月に最も高値で取引される．そのため，東京で根株養成を行った場合，根株の休眠期間を考慮すると正月の出荷に間に合わない．他方，東京と比べて低温の時期が早く訪れる高冷地においては，休眠が早く終わることが確認されている．そのため，東京から高冷地に根株を運び，高冷地の圃場で養成を行う，「山上げ栽培」が行われることが多い．私も一度，群馬県までウドの根株の引き取りに同行したことがある．トラックで行くのだが，帰りがけ，同じように荷台からウドの根株が覗いているトラックを何台か見かけた．ウド栽培の手伝いをしていなければ，それがウドであることに気づくことはなかったと思う．

根株養成後に掘りあげられたウドの根株は，いよいよ穴蔵に移される．穴蔵は，普段は雨が降りこんだり，人が誤って落ちたりしないように，入り口はビニールシー

[1] 弘前大学農学生命科学部

2013 年 10 月 30 日受稿　2013 年 10 月 31 日受理

トやゴザで覆われていた．また，光が入るとウドは変色して品質が落ちるため，根株を移した後は，収穫適期になるまで穴蔵が開けられることはほとんどない．そのような理由で，穴蔵は，ベールに包まれた，なんとなく気になる場所であった．

冬になって，自分が手伝いに行く日と，ウドの根株を穴蔵に移す日や，収穫の日が重なると，その覆われたシートをはずすところに立ち会うことができた．アルバイトを始めて最初の年，根株を穴蔵に移す日は逃したが，収穫の日に手伝いに行くことになった．私が通っていた農園には穴蔵が3，4個あり，時期をずらして根株の移植や収穫を行っていた．収穫のための道具を準備した後，いよいよ穴蔵の入り口をふさいでいたシートを外す．落ちないように足元に気を付けつつ，地上の入り口から穴の中を覗いたときのワクワクする感覚が思い出される．しかし，穴蔵は3～4 mの深さがあり，当然ながら，穴の中は真っ暗で，そのままではほとんど何も見えなかった．

ウドの収穫は，流れ作業だった．まず穴蔵で収穫したウドを，地上に設置した簡易なリフトで引き揚げ，それを作業室に運ぶ．そして，作業室で，ウドを一本ずつ袋詰めし，数本ずつ（所定の質量になるように）箱詰めする．安全性や，多くの人が穴蔵に入るとウドを傷つけやすいことなどから，農園のナオユキさんが穴蔵に入ってウドを収穫し，私や他の学生アルバイトを含めた数名が地上の作業を担当した．

ウドの収穫がある程度進み，中に空間ができたということで，穴蔵の中を見せてもらえることになった．ライトをつけ，やはり落ちないように慎重にはしごに足をかけてはしごを伝って下りていくと，上層の土は黒色（クロボク土）で，ある深さまで行くと赤っぽい立川ローム土に変わるのが分かった．そして，地下室に着くと，暖かく（冬だったため，地上と比べて温度が高い），湿度が高い．設置されていた温湿度計の表面が曇っているのが分かった．そして，出迎えてくれたのは，土壁を背に，スッと伸びた何本もの真っ白なウドであった．

関東ローム，特に下層の立川ローム土は保水性が高く，湿度が保たれやすい．この湿度と，地下の温度がウドの萌芽と軟化を促進する（ただし，寒いときには穴蔵の中を加温することもある）．さらに立川ローム土は強固な土壌構造をもつため，この穴蔵を作るのに適しており，穴が崩れることはほぼない．東京の多摩地域は立川ローム土が厚く堆積しており，これは白ウドの栽培が盛んな理由とも言える．

地域ごとの気候に応じた地温や，関東ロームの力学性，物理性，また，土壌中で生じる水・熱移動のような物理現象は確かに，ウドの生長の一翼を担っていることを実感した．土壌中の水・熱移動を考えるとき，今も時折，真っ白なウドの姿，ウドの穴蔵で感じた暖かさ，湿気が思い出される．

ウド栽培の手伝いの時に感じたワクワク感や驚きは，土壌物理学の理解を助けてくれ，また，現在でも土壌物理分野に携わっているきっかけの一つになっていると思う．このような研究や勉強のヒントは，おそらくいろいろなところに散らばっていると思う．このときの感覚を忘れずに，あらゆる物事に興味を持って今後も研究に取り組んでいきたいと思う．

引用文献

東京うど物語編集委員会編（1997）：東京うど物語，pp. 20–28, 117–128.

東京農業WEBサイト http://www.tokyonogyo.jp/

J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 125, p.63 ~ 64 (2013)

書　評
Book review

土と農地　―土が持つ様々な機能―

長谷川周一著
養賢堂 2013 年 4 月 8 日発行
A5 版 172 頁 ISBN978-4-8425-0514-5 定価本体 2,400 円 + 税

本書は，土壌の物理的な機能について説明したものである．タイトルだけみると，土壌科学の一般的な解説書と思われるかもしれないが，本書は土壌物理学の教科書そのものである．最新の研究成果と共に，現在の土壌物理学が扱うほとんどのテーマについて，基礎的・応用的な知識が本書を一読することで習得できる．

土壌物理学の教科書として本書をめくったときに，まず驚くのは，数式がほとんど無いことである．しかも，数少ない数式に使われているのは，足し算，引き算，掛け算，割り算であり，微分積分は登場しない．「はじめに」で著者は「土中の物理現象は数式を用いることにより簡潔に表現できるというよい点がある反面，数式が出てくることで，前に進めない学生も多い．そこで，本書では高等学校で習うオームの法則程度の数式にとどめ，現象の理解に重点を置くことにした」と述べているが，本当に微分積分を使わずに土壌物理学の教科書を書き上げてしまうことに驚かされた．

数式をあまり使っていないからといって，一般的な解説書の類かと思って本書を読むと，その期待は裏切られることになる．本書は前半で土壌物理学の基礎的なことを，後半で応用的なことを説明する構成になっている．前半の基礎部分では，土壌の乾燥密度や三相割合といった基本的なことから，土壌中の水，熱，溶質，ガスの移動に関する説明まで，土壌物理学の根幹をなす土壌中の物質移動に関する物理現象のほとんどが網羅されている．学生のころ，溶質移動を勉強したときに，移流分散方程式が微分形式で出てきて，そこで溶質移動は難しいという印象を植え付けられた覚えがある．本書では，移流・分散現象や固液分配係数といった，溶質移動に不可欠な概念について，その考え方を中心に説明し，溶質の移動をどのように整理し，理解したら良いのかがわかるようになっている．熱や土壌水分の移動現象についても同様に，どのように考えたら良いかがわかりやすく書かれている．数式は現象を正しく記述するのに必要不可欠なツールであるが，それが意味するところを理解するには，その現象に不案内の読者には難しい場合が多い．そのとき，ある現象をどのように理解したら良いかがわかっていれば，数式が出てきても，その意味するところを理解するのはずっと簡単になる．そのため，本書は土壌物理学を本格的に勉強する前に読むと，とても有益だと考えられる．私自身，土壌物理学を勉強し始めた学生のころ，この本に出会っていたらどんなに良かっただろう，と感じた．数式を極力使わずに物理現象の概念を説明することは，実は易しいことではない．このことが，土壌物理学の教科書に数式が多用される要因の一つかもしれないが，本書では見事にこれを実現している．

後半の応用部分では，実際にフィールドで起きている現象について，豊富な事例や実測データに基づいた議論が展開されている．ここでは，前半で取り扱われた土壌中の水・熱・溶質・ガスの移動理論を応用して，実際に畑でおきている現象をどう理解したら良いかということが，過去の研究事例に基づいて記述されている．水田の暗渠，汎用水田，温室効果ガス，畑作物の根の呼吸や吸水，畑への施肥に由来する地下水汚染，畑地灌漑，農地保全等，様々な現象が取り扱われており，土壌物理学が関与する分野の広さを再認識させられる．水田の暗渠がヨーロッパから輸入した畑の暗渠とは考え方が全く異なり，日本独自の技術として発展したものであることや，水田よりも畑の方が実は地下水涵養機能が高い可能性があることが指摘されている点など，目からうろこの議論が散見される．また，高知県の棚田や中国のボーダー灌漑など，豊富な写真が掲載されており，実際の現場を理解するのに役立つ．土壌物理学も農学の一分野であり，フィールドで起きている現象を理解することはとても大切なことである．しかし，実験室とは異なり，フィールドの現象は複雑であり，これがしばしば研究者の理解を妨げる．本書では，いくつかの研究実例を通して複雑なフィールドでの現象を理解するための考え方が示されており，読者はここから，自分の研究のヒントが得られるかもしれない．また，本書の豊富な事例を通して，土壌物理学が実社会にどのように役立っているかが学習できる．

本書の内容のほとんどは土壌物理学の範疇であるが，最後の章だけは土壌物理学に留まらず，日本や世界における食料生産に使われる土地や水，エネルギーに関する問題を取り扱っている．一見，この章だけ内容が浮いているように思える．しかし，土壌物理学が農学の一分野である以上，最終的なゴールとしては，これらの問題を

2013 年 11 月 8 日受稿　2013 年 11 月 8 日受理

解決するために研究していることを思うと，最後にこの章が来ることに納得する．巻末の略歴によると，著者は研究人生の多くの期間を農林水産省の研究所や国際研究所で過ごしているが，ここで様々な分野の研究者と接することで，こうした広い視野を持ちながら研究することの大切さを実感したのかもしれない．そうした著者のメッセージが，この章に込められているように感じた．

この本の最後は，次の文章で締めくくられている．「ただ，若い女性は相変わらず洋食が多いようである．将来の母親となる彼女たちに和食を食べてもらうにはどうしたらよいか．」もう少し格好の良い文章で締めくくるのかと思っていたら，見事に期待を裏切られた．そこには，全く気負いがみられず，とても親しみやすい文章があった．個人的には，農林水産省の研究所に長年勤めた著者の経歴を思うと，この文章をとても興味深く読んだ．私が勤務している農林水産省管轄の独立行政法人の研究所では，国民がパンを食べたいと言ったら，パン用の小麦の増収，うどん用の小麦をパンにする，米を粉にして良いパンを作るような研究が実施され，そうした研究が評価されている．実際，こうした研究はとても重要である．しかし，国民目線が叫ばれ，それがとても重視されている現在こそ，少し先を見据えたときに，こういうライフスタイルもありますよ，といったことを提案するような研究も必要なのではないか，というメッセージがこの一文に込められているように思う．

「はじめに」で著者が述べているように，この本は農学を勉強する大学生と農業に興味がある学校教師や一般の人が，土壌の物理性に関する知識を身に着けるのに向いている．前述のように，土壌物理学を本格的に学ぼうとする学生は，特にこの本から始めることをお勧めする．農業工学以外の研究者から，土壌の物理性は大切だと思うのだけれど，難しい数学が出てくると，どうもそこから先の理解が進まない，という話を聞くことがある．そうした，農学系の研究者も，この本を読めば，まさに知りたかった知識が得られるのではないかと思う．土壌物理学を専門とする研究者や大学院生にとっても，少し自分の専門とは異なる研究対象を扱わなければいけないときや，新しい研究のために自分の視野を広げたいときなどは，本書が役立つ場合があると思う．多くの読者がこの本を手に取り，今後の研究や教育，農業現場に役立てることを期待する．

岩田幸良
（農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所）

会 務 報 告

I. 2013（H25）年度第 3 回編集委員会

開催形式：電子会議
日　　時：質疑応答・討論
　　　　　2013 年 8 月 7 日～ 8 月 20 日
　　　　　採決
　　　　　2011 年 8 月 21 日～ 9 月 3 日
出席委員：取出，江口，小杉，齊藤，千葉，釣田，
　　　　　中川，中野，橋本，宮本，山口
　　　　　（委員 11 名中 11 名参加：成立）
議事内容
　1. 議題
　　（1）編集作業の手引きの改案について
　　（2）編集作業の流れの改案について
　　（3）その他　125 号発行に向けて

II. 2013（H25）年度第 2 回評議員会

開催形式：メール会議
日　　時：2013 年 9 月 25 日～ 10 月 3 日
出　　席：石黒，岩田，柏木，千葉，江口，加藤，
　　　　　西村，原口，吉田，取出，成岡，中村，
　　　　　森，諸泉，中野，山口，小林，武藤
議　　題：
　1. 審議事項
　　IUSS の次期役員（Division，Commission の Chair, Vice-Chair）選挙への選挙人選出について
　2. 承認事項
　　シニア会員入会承認

III. 2013（H25）年度第 3 回事務局会議

日　　時：10 月 1 日（火）17:00 ～
場　　所：東京大学大学院農学生命科学研究科
　　　　　（三重大学との間は TV 会議）
出　　席：溝口（会長），吉川（副会長），取出（編集委員長），吉田（庶務幹事），西村（庶務幹事），西田（会計幹事），渡辺（編集幹事）
議　　題：
　1. 大会講演会・エクスカーションの準備・当日の運営について
　2. 大会直前の評議員会および総会の議事および作成資料の確認
　3. 学会賞候補の選考の経過報告
　4. 編集委員会関係案件
　　（1）125 号の発行計画と査読状況について
　　（2）投稿数の確保と投稿費について
　5. 会費納入依頼の発送について

IV. 2013（H25）年度第 3 回評議員会

日　　時：2013 年 10 月 25 日
場　　所：コラッセ福島
出　　席：溝口（会長），吉川（副会長），石黒，岩田，柏木，千葉，江口，西村，原口，吉田，取出，成岡，中村，諸泉，中野，小林，武藤，渡辺（編集幹事），西田（会計）
　　　　　（委任状）加藤，山口，森
議　　事：
　1. 審議事項
　　（1）2013 年度事業計画（案）
　　（2）2012 年度会計決算（案）・監査報告
　　（3）2013 年度会計予算（案）
　　（4）総会および総会議長について
　　（5）2013 年度学会賞（論文賞）
　　（6）学会賞（論文賞）の選考方法について（規定の一部改正について）
　　（7）その他
　　　学会誌の電子ジャーナル化の検討について
　　　シニア会員入会承認
　2. 報告事項
　　（1）会員動向
　　（2）編集委員会報告

V. 2013（H25）年度通常総会

日　　時：2013 年 10 月 26 日
場　　所：福島市・福島大学 M 棟
議　　題：
　1. 2013 ～ 2014 年度役員紹介
　2. 2013 年度事業計画（案）
　　（1）会議の予定
　　（2）シンポジウム開催要領
　　（3）研究集会の後援，共催について
　　（4）ホームページを活用した会員サービスの展開について
　3. 2012 年度会計決算（案）・監査報告
　4. 2013 年度会計予算（案）
　5. 2013 年度学会賞（論文賞）報告
　6. 学会誌の電子ジャーナル化の検討について

VI. 2013（H25）年度第 4 回編集委員会

開催形式：電子会議
日　　時：質疑応答・討論
　　　　　2013 年 10 月 29 日～ 11 月 5 日
　　　　　採決
　　　　　2013 年 11 月 6 日～ 11 月 8 日
出席委員：取出，江口，小杉，齊藤，千葉，釣田，
　　　　　中川，中野，橋本，宮本，山口

（委員 11 名中 11 名参加：成立）

議事内容

1. 議題

（1）編集委員長より提案のあった「土壌の物理性 125 号」の発行計画が全会一致で承認された.

2. 報告

（1）編集幹事より，現在の閲読の進行状況について報告がなされた.

3. その他

（1）「研究紹介」投稿の呼びかけについて

VII. 会員消息（2013 年 11 月 14 日まで，敬称略）

入会	シニア会員	足立 一日出
	正 会 員	瀬川 孝夫
	正 会 員	橋本 洋平
	正 会 員	二川 雅登
	正 会 員	柳川 亜季
	正 会 員	Rudiyanto
	正 会 員	山下 祐司
	学生会員	阿部 森也
	学生会員	石川 聡子
	学生会員	石橋 咲耶
	学生会員	岩崎 有美
	学生会員	上田 哲大
	学生会員	岡橋 卓朗
	学生会員	長田 友里恵
	学生会員	片山 高嗣
	学生会員	釘崎 佑樹
	学生会員	小谷 駿太郎
	学生会員	佐々木 道子
	学生会員	佐藤 直人
	学生会員	田川 堅太
	学生会員	竹内 萌実
	学生会員	辰野 宇大
	学生会員	筒井 亮
	学生会員	土井 俊弘
	学生会員	名倉 理紗
	学生会員	成毛 千尋
	学生会員	平嶋 雄太
	学生会員	三木 真隆
	学生会員	光岡 伸子
	学生会員	南 隼人
	学生会員	村上 佳織
	学生会員	村田 光明
	学生会員	山崎 琢平
	学生会員	山田 健太
	学生会員	山野 泰明
退会	正 会 員	相澤 泰造
	正 会 員	高橋 悟
	正 会 員	深見 公一郎
	正 会 員	保井 聖一
	正 会 員	森澤 太平
	学生会員	宮本 珠未
	学生会員	滝沢 啓
	学生会員	山本 哲也

現在会員数（2013 年 11 月 14 日現在）

正会員（国内）	: 283
正会員（海外）	: 6
シニア会員	: 11
学生会員（国内）	: 51
学生会員（海外）	: 1
賛助	: 8
小 計	: 360
購読会員数	: 43
合 計	: 403

―編 集 後 記―

今年度，本誌の編集体制が刷新されるにあたり，新たに編集委員として声をかけて頂いた．今私がご飯を食べさせて頂いているこの「土壌物理学」という学問に対して少しでも恩返しが出来ればとの思いで，微力ながらも力を尽くさせて頂きたいと考えている．さて，委員を拝命してすぐにある論文の担当となり，後述するように悪戦苦闘しながらも何とか査読のプロセスを一通り終えることが出来た．夏の農業農村工学会でお会いした編集幹事の渡辺先生より，「査読プロセスが最初に終了した編集委員に編集後記の執筆をお願いしたい」とのお話を受け，今この文を執筆している次第である．現在，他学会においても編集の仕事を担当させて頂いているが，あくまで編集作業の一部を分担しているだけであり，今回初めて査読者の選出から査読の終了までを一人で担当させて頂くこととなった．実際に編集者として仕事をしてみて，その作業が容易であったものから困難であったものまでさまざまであったが，予想外に大変さを感じたのは，「査読者の匿名性を維持するための事務処理」であった．査読者からの意見を取りまとめて著者に送る際，査読者が誰であるか分からないように書類等を整える必要があるが，決してミスが許されない作業である上に，類似する複数の書類を混同することなく扱う際に気を使う点が多くあり，生来几帳面とは言い難い性格の私にとっては，何度確認をしても不安感がぬぐえない，大変な作業であると感じた．今回このような気苦労があることを知ったと同時に，これまで自分が執筆した論文の数と同じだけ，この苦労をされた編集者がおられたことに改めて感謝した次第である．そして，編集委員をお引き受けした際から難しいであろうと予想していた通り，やはり実際に難しいと感じたのは，編集者と論文内容との関わりについてである．編集者は本来，複数の査読者の意見を取りまとめる立場にあるが，事務処理した書類を単に右から左へと流すロボットではなく，かといって第三の査読者として自分の満足するまで内容修正を求める者でもない．正直，未熟で経験も浅い自分にはそのさじ加減がまだ全く分かっていないというのが現状である．しかし，今回の仕事を通じて，このさじ加減を決める重要なキーワードの一つが「より良い論文のため」という言葉にあることだけは，分かった気がする．まずはこの言葉を胸に，本誌の発展に少しでも貢献できればと考えている．

齊藤忠臣（編集委員）

土壌物理学会会則

第 1 条　本学会は土壌物理学会（Japanese Society of Soil Physics）と称する．

第 2 条　本学会は土壌物理に関する研究の進歩と普及を図り，農業技術および環境科学の発展に貢献することを目的とする．

第 3 条　本学会はその目的を達成するために次の事業を行う．

（1）研究発表会，討論会および見学会などの開催

（2）学会誌「土壌の物理性（Journal of the Japanese Society of Soil Physics）」並びにその他の印刷物の発行

（3）内外の研究，技術の交流および他の学会，諸団体との協力

（4）優れた論文に対する表彰

（5）その他，本学会の目的を達成するために必要な事業

第 4 条　本学会の会員は，正会員，シニア会員（これまで正会員であって 60 歳以上の常勤職に就いていない者），学生会員および賛助会員，購読会員の 5 種とする．学会への入会または退会の際は，本学会に届け出なければならない．

第 5 条　会員は次の会費を所定の期日までに納めるものとする．

正 会 員	年額	5,500 円
シニア会員	年額	3,000 円
学生会員（大学院生を含む）	年額	3,000 円
賛助会員	一口年額	22,500 円
購読会員	会誌年額	7,500 円
広 告 料	賛助会員	15,000 円
賛助会員以外		22,500 円

第 6 条　本学会に次の役員をおく．任期は 2 年とする．ただし，3 期連続の重任は認めない．選出方法は次による．

（1）会長 1 名，副会長 1 名，編集委員長 1 名
正会員の中から評議員会によって選出される．

（2）評議員
イ　15 名　正会員の中から選挙によって選出される．
ロ　3 名以内を会長が正会員の中から委嘱する．

（3）会計監査 2 名
正会員の中から評議員会によって選出される．

（4）幹事若干名
若干名の庶務，会計，編集の幹事を会長が委嘱する．

第 7 条　会長は毎年 1 回以上総会並びに評議員会を招集する．

（1）総会は本学会の最高議決機関であって，事業計画，予算・決算，会則の変更等を決定する．総会は正会員，シニア会員および学生会員で構成される．

（2）評議員会は，会員の選挙によらない役員の選出，総会議案，その他の重要事項を検討する．評議員会の議長は会長がこれにあたる．

（3）総会および評議員会の議決は委任状を含む多数決とする．ただし，会則の変更は，総会出席者の 3 分の 2 以上の賛成を要する．

第 8 条　本学会の会務は，評議員会および総会の議を経て，会長，副会長，編集委員長および幹事がこれを執行する．会務執行に必要な規程は別に定める．

第 9 条　本学会に次の委員会をおく．

（1）選挙管理委員会
正会員の中から評議員会によって選出され，本学会の評議員選挙を管理する．

（2）編集委員会
正会員の中から評議員会によって選出される委員によって構成され，学会誌その他の印刷物の編集に当たる．

（3）学会賞選考委員会
正会員の中から評議員会によって選出される委員によって構成され，学会賞を選考する．

第 10 条　本学会の経費は会費その他の収入を持ってあてる．本学会の会計年度は毎年 4 月 1 日に始まり翌年 3 月 31 日に終わる．

附則

（1）本学会の連絡先は，これを当分の間次に置く．
〒113-8657　東京都文京区弥生 1-1-1
東京大学大学院農学生命科学研究科　内

（2）本会則は，2011 年 4 月 1 日より施行する．

（2011.10.28 改正）

細則

（1）シニア会員

1）シニア会員は，これまで正会員であって 60 歳以上の常勤職に就いていない者

2）シニア会員への変更は，資格を有する会員からの申告を受け，評議員会の承認を受ける．原則として申告された年度から適応するが，当該年度中に有資格となった場合は，次年度から適応する．

3）シニア会員の権利は正会員に準ずる．ただし，会則第 6 条で定める役員および第 9 条で定める委員会委員に就くことはできない．

（2011.10.28 制定）

「土壌の物理性」投稿規定

1. 筆頭著者は本学会会員であること．
2. 投稿原稿の区分と規定ページは下記による．
   1）「論文」（Original papers）：独創性があり，土壌の物理性に関する研究および技術の進歩に寄与すると見なされるもの．一編ごとに論文としての構成を整えていて，他誌に未発表のものに限る．規定ページを刷り上がり 6 ページ以内とする．
   2）「研究ノート」（Notes）：土壌の物理性に関する新しい事実や研究方法の改良などの短い報告で，独創性があり他誌に未発表のもの．規定ページを刷り上がり 4 ページ以内とする．
   3）「総説」（Reviews）：土壌の物理性に関する主題について，それまでの研究を総括し，今後の発展方向を展望するもの．規定ページを刷り上がり 6 ページ以内とする．
   4）「解説」（Lectures）：土壌の物理性に関する諸事項の理解を計るための平易な解説，ならびに研究技術の普及交換を進めるための紹介など．規定ページを刷り上がり 6 ページ以内とする．
   5）「研究紹介」（My research）：現在行っている研究，他の学会誌等に掲載された論文，研究上の工夫などについての平易な紹介．規定ページを刷り上がり 6 ページ以内とする．
   6）「資料」（Miscellaneous）：広く会員の参考となる報告や情報．規定ページを刷り上がり 6 ページ以内とする．
   7）「土粒子」（Readers' column）：「土壌の物理性」周辺のことについての随想や意見など．規定ページを刷り上がり 2 ページ以内とする．
   8）「講座」（Lecture series）：「解説」と本質的な違いはないが，特に編集委員会が企画して複数回にわたって行うものを指す．規定ページを刷り上がり 6 ページ以内とする．
   9）「特集」（Topics）：「解説」，「総説」，「論文」，「研究ノート」が混在したもので，特に編集委員会が企画して複数回にわたって行うものを指す．規定ページを刷り上がり 6 ページ以内（「研究ノート」では 4 ページ以内）とする．
   10）「書評」（Book reviews）：規定ページを刷り上がり 2 ページ以内とする．
   11）「巻頭言」（Foreword）：規定ページを刷り上がり 2 ページ以内とする．
   なお，上記区分において，編集委員会が会員または会員以外に投稿依頼することがある．
3. 原稿の採否は編集委員会が決定する．編集委員会は，「論文」および「研究ノート」については 2 名，その他の投稿原稿には 1 名の閲読者を選んで閲読を依頼する．ただし，「土粒子」，「書評」，「巻頭言」については，この限りでない．
4. 投稿原稿が 2．に記す規定ページを越える場合には，1 ページあたり 15,000 円を著者負担とする．ただし，編集委員会が会員または会員以外に投稿依頼した原稿の場合はこの限りでない．また，カラー印刷の場合は実費を著者負担とする．
5. 投稿する場合は、投稿原稿（本文，図表含む）および原稿送り状（別紙書式）の PDF ファイルを編集委員長宛に提出する．ただし、編集委員会が別途指示した場合はこの限りではない．
6. 投稿原稿を受け付けた場合，編集委員会は速やかに受付番号と受付日付を明示した電子メールまたは書状を投稿者に送る．また，投稿原稿の掲載を決定した場合，最終原稿を受領したのちに受理日付を明示した書状を著者に送付する．
7. 著者に対して修正を求めた原稿が，特別な事情なく 6 ヶ月以内に再提出されないときは取り下げと見なす．
8. 著者校正は初校のみとする．また，特に申し出がない限り印刷ずみの原稿は返さない．
9. 掲載された原稿の PDF ファイルを著者に贈呈する．また，著者は別刷りを印刷業者から購入することができる．
10. 本誌に掲載された原稿の著作権は土壌物理学会に帰属する．

（2012.12. 20 改正）

「土壌の物理性」原稿執筆要領

全般的事項

1. 原稿は，日本語または英語で執筆する．
2. 日本語の原稿は，A4 判，25 字，26 行とし，上下左右に 30 mm 以上の余白をとる（4 枚で 1 ページになる）．
3. 日本語の投稿原稿（ただし，書評は除く）は，はじめに日本語で表題，著者名を書き，そのあとに英語で表題と著者名（フルネーム）を書いてから本文を書き始める．英語の表題は，冒頭の単語の頭文字のみを大文字とし，それ以降は固有名詞等，特に大文字が必要な場合を除き，全て小文字とする．英語の著者名は名の 1 文字目および姓の全てを大文字で記す．また，第 1 ページ下の脚注に，著者の所属機関と所在地を英語で，Corresponding Author とする著者の氏名と所属を日本語で記す．
4. 日本語の論文および研究ノートは，英語による表題・著者名と本文との間に英語で 300 words 程度の Abstract と 5 個以内の Key words を入れる．
5. 日本語の投稿原稿（ただし，資料と土粒子，書評を除く）は，引用文献の後に日本語で 350 字程度の要旨，および 5 個以内のキーワードを書く．
6. 英語の原稿は，A4 判，ダブルスペースで作成する（約 600 words で 1 ページになる）．
7. 英語の投稿原稿（ただし，書評は除く）は，Manuscript title，Full name of authors を書いてから本文を書き始める．著者名は First name の 1 文字目および Family name の全てを大文字で記す．また，第 1 ページ下の脚注に，Address of institutions of authors および Corresponding author を記す．
8. 英語の論文および研究ノートは，Full name of authors と本文の間に 300 words 以内の英文 Abstract と 5 個以内の英語の Key words を入れる．
9. 英語の投稿原稿（ただし，資料と土粒子，書評は除く）は，引用文献の後に，日本語で表題と著者名，所属機関，所在地，350 字程度の要旨，5 個以内のキーワードをつける．なお，著者が外国人のみのために日本語部分の作成が困難な場合，英語部分からの和訳により，編集委員会の責任でこれらを作成する．
10. 英語の適正化はすべて著者の責任において行うこと．自然科学論文の執筆や校正に経験のある英語のネイティブスピーカーによってチェックされている事が望ましい．
11. 閲読終了後に最終原稿を提出するときには，編集委員会が指示する形式の電子ファイルを送付する．

本文

12. 原稿には，閲読作業の効率化を図るため，本文に行番号を 5 行毎に書き入れる．
13. 章の見出しは 1.，2.，3.，節の見出しは 1.1，1.2，1.3，項の見出しは 1.1.1，1.1.2，1.1.3 のようにし，字体はゴシック体とする．
14. 略語，略号を使うときには，はじめにそれが出たときに正式名称とともに示す（例：陽イオン交換容量（CEC））．
15. 単位の使い方は，国際単位系（SI）による．

図表

16. 日本語および英語の原稿ともに，図または写真の番号は Fig. 1，表は Table 2 のように書く．
17. 日本語の論文，研究ノートの場合，図，表，写真の題名には英語を併記する．
18. 図，表，写真は必要最小限度とし，同一事項を表と図に重複して表示する事は避ける．
19. 図，表，写真は 1 ページに 1 つずつ貼り付け，余白に図表等の番号を記す．
20. 図と写真はそのまま製版されるので，鮮明なものを提出する．
21. 図は 1/2 倍などとおよその縮小率を指定し，2 倍くらいに大きく書く．図の線の太さや文字の大きさは，刷り上がりの大きさを考慮して決める．
22. 地図や顕微鏡写真には定尺をつけ，縮尺や倍率はつけない．
23. 図，表，写真の番号と題名は，別紙にまとめて一覧表とする．

引用文献

24. 本文中で文献を引用する場合は，著者名（西暦），または（著者名，西暦）とする（例：Tanaka（1994），(Nakamura and Suzuki, 1981)）．著者が 3 名以上の場合は第 1 著者名のあとに―ら，または et al. をつける（例：山田ら（1978），(Tayler et al., 1945)）．
25. 引用文献は，本文のあとに著者名の ABC 順に書く．未発表，私信は引用文献として記載しない．
26. 引用文献の書き方は以下のようにする．

＜雑誌＞

森本　聡, 永田　修, 川本　健, 長谷川周一 (2009): 泥炭林土壌の温室効果ガスの生成と消失．土壌の物理性, 113: 3-12.

Fujimaki, H., Ando, Y., Cui, Y. and Inoue, M. (2008): Parameter estimation of root water uptake model under salinity stress. Vadose Zone Journal, 7: 31-38.

Millington, R.J. and Quirk, J.P. (1959): Permeability of porous media. Nature, 183: 387-388, doi: 10.1038/183387a0.

Bitteli, M., Flury, M. and Campbell, G.S. (2003): A thermo dielectric analyzer to measure the freezing and moisture characteristic of porous media. Water Resour. Res., 39(2): W1041, doi: 10.1029/2001WR000930.

＜単行本＞

Tinker, P.B. and Nye, P.H. (2000): Solute movement in the rhizosphere, p.308. Oxford University Press, New York.

土壌環境分析法編集委員会編 (1997): 土壌環境分析法, pp.129-138. 博友社, 東京.

松森堅治 (2005): 地理情報システムを用いた窒素負荷予測モデル. 波多野隆介・犬伏和之編　続・環境負荷を予測する, pp. 60-79. 博友社, 東京.

Jury, W.A. (1996): Stochastic solute transport modeling trends and their potential compatibility with GIS. In Corwin, D.L. and Loague, K. (ed.) Application of GIS to the modeling of non-point source pollutants in the vadose zone, pp.57-67. SSSA Special Publication No. 48, Madison.

＜Web ページ＞

FAO-AGL (2000): Global extent and location of sodic soils. Available at http://www.fao.org/ag/AGL/agll/prosoil/sodic.html.（確認年月日）

野菜茶業研究所 (2006): 野菜の硝酸イオン低減化マニュアル. http://vegetea.naro.affrc.go.jp/joho/manual/shousan/index.html.（確認年月日）

（雑誌のページには p. や pp. をつけない．本の単数ページを示す場合には p.，複数ページを示す場合には pp. をつける）

その他

27. 本要項のほか，科学技術情報流通技術基準（SIST）に準拠する．

（2012.12.20 改正）

[土壌物理分野の SI 使用例]

国際単位系（SI）については多くの出版物で解説されているので，ここには，土壌物理に特に関連の深い単位の使用例を示す．

	推奨される単位	認められる単位
含水比	$kg\ kg^{-1}$	*
体積含水率	$m^3\ m^{-3}$	
体積	m^3	L, cm^3, mL
密度	kg m^3, Mg m^{-3}	
濃度	kg m^{-3}, Mg m^{-3}	g L^{-1}, mg L^{-1}
モル濃度	mol m^{-3}	mol L^{-1}
力	N	
水分ポテンシャル	J kg^{-1}	kPa, m, cm, **
透水係数	m s^{-1}	cm s^{-1}
イオン交換容量	$mol_c kg^{-1}$, $cmol_c\ kg^{-1}$	
回転数	s^{-1}	min^{-1}
収量	kg m^{-2}	kg ha^{-1},Mg ha^{-1},t ha^{-1}

* % 表示は，原則として分母と分子の内容が同じものの場合にだけ用いる．

** cm H_2O は使わない．

その他，疑問のあるものについては意見を聞いて編集委員会で検討する．

（2000. 3.10 改正）

「土壌の物理性」投稿案内

1. 投稿原稿に対する基本方針

編集委員会は常に会員からの自主投稿を歓迎すると共に，投稿された原稿をなるべく早く，できるだけ掲載する方向で処理したいと考えています．ただし，「土壌の物

理性」に掲載する原稿は読者にとって有益かつ完成したものであることが必要です．編集委員会は，投稿原稿が「土壌の物理性」に掲載するのにふさわしい内容を持つ原稿であるかどうかを基準として，掲載の可否を判断します．なお，他誌との二重投稿は認められません．

2. 投稿原稿に求められるもの

投稿に当たっては，「投稿案内」と共に「投稿規定」「原稿執筆要領」をよく読んでそれに従うと共に，閲読者が多忙な中で時間を割くことをよく理解して最大限に努力して完成した原稿としてから投稿して下さい．投稿原稿に求められるものは下の通りです．

(1) 内容について
1) オリジナリティーがあること（論文，研究ノートの場合）．
2) 本誌の読者にとって有益であること．
3) 導入，研究手法から結論に至る過程に論理性があること．

(2) 表現について
1) 原稿全体の構成が整っていること．
2) 表題が適切であること．
3) 文章表現が適切であること．
4) 英文アブストラクトや和文要旨が適切であること．
5) SI 単位や記号の使い方が適切であること．
6) キーワードが適切であること．
7) 英語の表現が適切であること．

3. 投稿原稿の受付

編集委員会は投稿原稿が体裁上最小限必要とする条件を満たしていることを確認した後，原稿を受け付けます．条件を満たしていない場合には，著者への問い合わせ，もしくは原稿を受け付けずそのまま返稿する場合があります．

4. 閲読の目的と姿勢

編集委員会は受け付けた投稿原稿が「土壌の物理性」へ掲載するのにふさわしいかどうかを判定する資料を得るために閲読を行います．編集委員会は適任の閲読者を選定し，閲読を依頼します．　編集委員会は閲読者に対して特に次の点について注意をお願いしています．

1) 原稿の内容に対する責任は著者にあること．また，原稿の価値は読者が判断するものであること．
2) 閲読は内容の批判や討議を行うものではないこと．従って，見解の相違は掲載不適の理由にならないこと．
3) 閲読者は投稿者に対して研究指導する立場にないこと．従って，新たな実験や計算の追加要求などは極力避けること．
4) 閲読依頼期限を厳守すること．

閲読者から出された問題点について，編集委員会は原稿が投稿原稿に求められるものを満たすために必要に応じて著者に修正を求めます．ただし，これは著者に対する指導や助言ではありません．原稿の内容に対する責任はあくまで著者にあります．

5. 閲読の手順と投稿原稿の採否

(1) 編集委員会は論文，研究ノートについては 2 人，その他の区分の投稿原稿については 1 人の適任者へ閲読を依頼します．

(2) 閲読者は「2」の投稿原稿に求められる各項目について投稿原稿を評価し，閲読結果を全体意見および個別指摘事項と共に編集委員会へ報告します．

(3) 編集委員会は閲読結果を審議し，投稿原稿の採否を決定します．この際，論文・研究ノートについては原則として下のように取り扱います．
1) 閲読者 2 名とも総合判定が A（このまま掲載可）の場合には，閲読結果を受け取った日付で原稿を受理（掲載決定）します．
2) 1 名の総合判定は A，もう 1 名は B（指摘の点が修正されれば掲載可）の場合，または 2 名とも B の場合には，指摘事項について著者に比較的小さな修正を求めます．修正原稿が提出され，編集委員会が修正内容を確認した時点で受理します．
3) 1 名の総合判定は B，もう 1 名は C（指摘の点が修正された後，再閲読する必要あり）の場合，または 2 名とも C の場合には，指摘事項について著者にやや大きな修正を求めます．提出された修正原稿は再び閲読を行います．
4) 1 名の総合判定が D（掲載不適）の場合には，第 3 の閲読者に判定を依頼することを含め，編集委員会が対応を判断します．
5) 2 名の総合判定とも D の場合には，その理由を付けて著者へ返稿します．
6) 閲読は 2 回までとし，再閲読においても C または D の判定がある場合には，編集委員会が対応を判断します．

(4) 閲読結果の総合判定を D とする理由は次のようなものです．
1) 既発表とみなされるもの．
2) 重要な部分に根本的な誤りがあるもの．
3) 事実に基づいた内容ではなく，単なる主観が述べられているに過ぎないもの（論文，研究ノートの場合）．
4) 通説が述べられているだけで，新しい知見が全くないもの（論文，研究ノートの場合）．
5) 修正を要する根本的な指摘事項を多く含んでいるもの．
6) 連載形式で構成されており，1 編ごとに独立したものと認めがたいもの．
7) 全体構成や文章が粗雑で，内容の判定ができないもの．
8) 内容が本誌の趣旨に合わないもの．
9) その他，本誌に掲載する原稿としてふさわしくないもの．

6. その他
1) 共著者は全員が原稿に責任を負って下さい．共著者がいるにもかかわらず，その共著者が原稿を読んでないと判断されるような基本的なミスがある場合には，閲読を中止して返稿することがあります．
2) 修正原稿を返送する場合には，修正結果がすぐに分かるような回答書（指摘事項に対応した修正箇所・内容一覧）を作成し，添付して下さい．
3) 原稿は一度印刷公表されると末永く評価と批判の対象になります．閲読意見に対しては極力冷静かつ慎重に対処して下さい．誤解があった場合には，その誤解を解くだけでなく，誤解を受けないような書き方に改める努力が求められます．
4) 「掲載不適」で返稿された原稿を再投稿する場合は新規投稿扱いとなります．「掲載不適」とした理由を十分に確認・検討の上，再投稿して下さい．

（2004. 6.29 改正）

「土壌の物理性」閲読の手引き

1. 閲読依頼期限の厳守をお願い致します．万一，期限内に閲読が困難な場合には，速やかに編集委員会事務局へ連絡して下さい．
2. 「投稿案内」において，下のものを投稿原稿に求めています．閲読においても，これらをその基準とします．

(1) 内容について
1) オリジナリティーがあること（論文，研究ノートの場合）．
2) 本誌の読者にとって有益であること．
3) 導入，研究手法から結論に至る過程に論理性があること．

(2) 表現について
1) 原稿全体の構成が整っていること．
2) 文章表現が適切であること．
3) 表題が適切であること．
4) 英文アブストラクトや和文要旨が適切であること．
5) SI 単位や記号の使い方が適切であること．
6) キーワードが適切であること．
7) 英語の表現が適切であること．

3. 「掲載不適」とする理由としては，下のようなものが挙げられます．
1) 既発表とみなされるもの．
2) 重要な部分に根本的な誤りがあるもの．
3) 事実に基づいた内容ではなく，単なる主観が述べられているに過ぎないもの（論文，研究ノートの場合）．
4) 通説が述べられているだけで，新しい知見が全くないもの（論文，研究ノートの場合）．
5) 修正を要する根本的な指摘事項を多く含んでいるもの．
6) 連載形式で構成されており，1 編ごとに独立したものと認めがたいもの．
7) 全体構成や文章が粗雑で，内容の判定ができないもの．
8) 内容が本誌の趣旨に合わないもの．
9) その他，本誌に掲載する原稿としてふさわしくないもの．

4. 原稿の内容に対する責任はあくまで著者にあります．また，原稿の価値は読者が判断するものです．
5. 閲読は内容の批判や討議を行うものではありません．従って，見解の相違は掲載不適の理由にはなりません．

6. 閲読者は投稿者に対して研究指導する立場にありません．よって，新たな実験や計算の追加要求などは極力避けて下さい．
7. 閲読者は著者と直接折衝をしないで下さい．著者との交渉はすべて編集委員会の責任で行います．
8. 閲読者として知り得た印刷前の原稿の内容はいかなる形でも利用・引用等出来ません．厳にご注意下さい．
9. 著者に修正を求めた後に再閲読で総合判定を D（掲載不適）とすることは，閲読者にとっても著者にとっても非生産的です．完成度の低い原稿などにおいては，修正を求め再閲読を行うよりも「掲載不適」として練り直してから新たに投稿するよう促した方がよい場合があります．その場合には，「掲載不適」の理由（「3」参照）を明示して下さい．個別指摘事項への意見は不要です．
10. 閲読者から編集委員会へ意見等がある場合は，必ず「編集委員会への意見」として別紙への記入をお願いします．

（2003. 5.28 改正）

土壌物理学会学会賞規定

1. 種類
学会賞に論文賞と優秀ポスター賞をおく．
2. 論文賞の選考
論文賞は，年 1 回、以下の手順により論文賞選考委員会「以下，選考委員会」で審査し，評議員会で決定する．
（1）賞の対象とする論文は，「土壌の物理性」に，原則として前年度（前年 4 月 1 日から翌年の 3 月 31 日まで）に掲載された原著「論文」とする．
（2）正会員（1 名以上）は, 学会賞受賞候補として（1）に該当する論文を自薦もしくは他薦することができる．
（3）（2）に記す論文の推薦は，学会誌「土壌の物理性」に公示された募集を受け，所定の書類を必要部数揃え，期日までに学会事務局に提出しなければならない．
（4）選考委員会では，（1）に該当する論文の中から，（2）の推薦も考慮して受賞候補論文（以下，候補論文）を審査 · 選考し，評議員会へ付議する．
（5）評議員会では，候補論文が受賞に適格かどうかを判定する．
3. 優秀ポスター賞の選考
優秀ポスター賞（以下，ポスター賞）は年 1 回，以下の手順により決定する．
（1）選考の対象は，当該年度の土壌物理学会大会において発表されたポスターであって，筆頭者は会員とする．ただし，ポスターの筆頭者が学生の場合に限り，会員外であっても選考の対象に含める．
（2）ポスター賞は（1）に該当するポスターの中から，選考委員会および会員の投票により選考する．（5 件以下）
4. 表彰
（1）論文賞は，通常総会において表彰を行う．また会誌上に公表する．
（2）ポスター賞は，土壌物理学会大会において表彰を行う．また，会誌上に公表する．

（2002.11.23 制定　2013.10.26 改正）

土壌物理学会学会賞選考委員会規定

1. 目的
学会賞選考委員会（以下委員会という）は，論文賞および優秀ポスター賞の選考を行うことを目的とする．
2. 業務
委員会はつぎの業務を行う．
（1）学会賞規定に基づく論文賞および優秀ポスター賞の選考．
（2）土壌物理学会学会賞選考に関するその他の事項．
3. 構成
委員会は委員長 1 名および委員 5 程度を持って構成する．
（1）委員会は正会員より構成される．
（2）委員は評議員会の推薦に基づき総会で決定する．
（3）任期は 2 年とする．ただし，再任はさまたげない．
（4）委員長は委員の互選により選出する．
（5）若干名の専門委員をおくことを認める．
4. 開催
委員会は年 3 回程度開催する．

（2002.11.23 制定　2003.11.22 改正）

原 稿 送 り 状

受付番号（本会で記入）：

発送年月日	年　　月　　日	受付年月日（本会で記入）			年　　月　　日
区　分	論文　研究ノート　総説　解説　資料　研究紹介　土粒子　書評				
表題（和文）					
表題（英文）					
キーワード （日本語：５語以内）					
キーワード （英語：５語以内）					
著者名 1 ローマ字		所属		本会	会員 ・ 非会員
著者名 2 ローマ字		所属		本会	会員 ・ 非会員
著者名 3 ローマ字		所属		本会	会員 ・ 非会員
連絡先氏名					
住　所 電話 ·FAX 番号 E-mail	〒 TEL.：　　　　　FAX.： E-mail				
本文原稿枚数	A4：(　　　　枚)　·　400 字詰原稿用紙（　　　　枚）				
表　　　枚		図　　　枚		写真　　　枚	
別刷り	30 部　·　50 部　·　100 部　·　150 部　·　200 部　·　300 部				

付記：投稿の宛先は土壌物理学会ホームページを参照のこと（http://js-soilphysics.com/）

土壌物理学会会員登録用紙　[入会 · 退会 · 登録事項変更]

必要事項をご記入の上，このまま下記宛先に（郵便，FAX，E-mail の添付ファイルなどで）お送りください。

届出内容	入会　·　退会　·　登録事項変更
申込年月日	西暦　　　年　　　月　　　日
会員種別	正　·　学生　·　購読　·　賛助
氏名	
同上ローマ字読み	
性別	男　·　女
生年月（西暦年 · 月）	西暦　　　年　　　月
勤務先	
勤務先所在地	〒
勤務先電話番号 / FAX 番号	
勤務先 e-mail	
自宅住所	〒
自宅電話番号 / FAX 番号	
自宅 e-mail	
会誌の送付先	勤務先　·　自宅
本学会以外の主な所属学会	

本会記入
　受付年月日：
　承認年月日：

送付先 · 問い合わせ先

　土壌物理学会事務局（庶務幹事）
　〒 113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1
　東京大学大学院農学生命科学研究科　吉田修一郎 宛
　Tel. 03-5841-5344　　Fax. 03-5841-8169
　E-mail spsyomu@ml.affrc.go.jp

ISSN 0387-6012

Journal of the Japanese Society of Soil Physics

No. 125 December, 2013

Contents

Published by

Japanese Society of Soil Physics

Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657 Japan

http://js-soilphysics.com/